

Martin Tannhäuser

**Optimierung der Prozessparameter bei
dem Laserpulverauftragschweißen zur
Maximierung der Pulverumsatzmenge
bei gleichzeitig hohem
Pulvernutzungsgrad**

BACHELORARBEIT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik, Naturwissenschaft, Informatik

Mittweida, 2010

Martin Tannhäuser

Optimierung der Prozessparameter bei dem Laserpulverauftragschweißen zur Maximierung der Pulverumsatzmenge bei gleichzeitig hohem Pulvernutzungsgrad

eingereicht als

BACHELORARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik, Naturwissenschaft, Informatik

Mittweida, 2010

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. H. Exner

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Martin Erler

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 19.01.2011

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Motivation und Zielstellung	1
3. Stand der Technik	2
4. Versuchsaufbau.....	4
4.1. <i>Laseranlage</i>	4
4.2. <i>Pulverförderer</i>	6
5. Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	8
5.1. <i>Der Pulverstrahl</i>	8
5.1.1. <i>Untersuchung der Pulverstrahlform</i>	9
5.1.2. <i>Veränderung der Pulverstrahlform</i>	14
5.2. <i>Der Pulvernutzungsgrad</i>	17
5.2.1. <i>Einflussparameter auf den Pulvernutzungsgrad</i>	18
5.2.2. <i>Maximierung des Pulvernutzungsgrades</i>	31
5.3. <i>Pulversättigungsgrad</i>	33
5.3.1. <i>Einfluss der Laserleistung P_L</i>	34
5.3.2. <i>Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v</i>	38
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	41

Anhang Versuchsaufbau
Abkürzungs- und Formelverzeichnis
Literaturverzeichnis
Abbildungsverzeichnis
Eidesstattliche Erklärung

1. Einleitung

Beim Laserpulverauftragschweißen wird mit Hilfe eines Lasers Material auf ein Substrat aufgebracht. Das Material kann sowohl pulverförmig als auch in Form eines Drahtes vorliegen. Es wird raupenförmig, mit unterschiedlichen Breiten und Höhen aufgetragen. Vorwiegend wird diese Technik zur Aufbringung von Metallen verwendet. Ziel ist es beschädigte Bereiche zu reparieren oder, die Oberfläche eines Substrates mit bestimmten Eigenschaften zu versehen, z. B. zum Korrosionsschutz oder zum Panzern. Die aufgetragenen Schichten können dabei sehr unterschiedliche Stärken haben. Besonders wichtig ist allerdings bei allen Schichten, dass sie sich nur sehr wenig mit dem Substratmaterial aufmischen und dabei trotzdem eine gute Anbindung an das Substrat besitzen. Weiterhin soll der Prozess so effizient wie möglich sein, da er vor allem durch die Möglichkeit der Reparatur von Bauteilen eine Alternative zur Neuanschaffung ist.

2. Motivation und Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Effizienz des Prozesses des Laserpulverauftragschweißens an der in Abschnitt 4. beschriebenen Anlage zu maximieren. Das heißt vor allem das eingesetzte Pulver vollständig und mit möglichst wenig Laserleistung P_L umzusetzen. Um das Pulver maximal auszunutzen musste dabei der Pulverstrahl optimal geformt werden. Er sollte deshalb einen, auf den Laserstrahlfokus angepassten Pulverstrahlfokus besitzen und eine möglichst hohe Wechselwirkungszeit des Pulverstrahls mit dem Laserstrahl um diesen vollständig aufzuschmelzen. Dazu sollten die Pulverpartikel bei dem Austritt aus der Pulverdüse eine möglichst geringe Geschwindigkeit besitzen. Daher wurden zuerst die möglichen Einflussfaktoren untersucht, die diese Größen beeinflussen könnten. Anschließend wurde die Untersuchung laserseitig fortgeführt. Das heißt es wurde versucht mit den zuvor erlangten Erkenntnissen den Pulvernutzungsgrad η bei der Erzeugung von Auftragschweißspuren zu bestimmen und zu maximieren. Abschließend wurde noch untersucht wie viel Pulver bei einer bestimmten

Laserleistung P_L und guten Spurqualität maximal umgesetzt werden konnte. Ziel war es Parametersätze zu finden bei denen Auftragschweißspuren unterschiedlicher Spurbhöhe h mit maximalem Pulvernutzungsgrad η und optimaler Ausnutzung der eingesetzten Laserleistung P_L erzeugt werden konnte.

3. Stand der Technik

Im Prozess des Laserpulverauftragschweißens gibt es viele Einflussgrößen, die die Effizienz und den Wirkungsgrad bestimmen. In [1, Seite 39] wurden die Anforderungen an das Pulverfördersystem gestellt. Die wichtigsten davon sind:

- Konstanter und gut steuerbarer Pulvermassenstrom \dot{m}
- Niedrige Partikelgeschwindigkeit in der Schmelzzone
- Schutzgasabschirmung des Schmelzbades und
- Hohe Energienutzung des Laserstrahls.

Bereits in diesem, 1997 veröffentlichten Werk, war der Einfluss der Partikelgeschwindigkeit in der Schmelzzone bekannt und es wurde angestrebt diese zu verringern.

In dem, 1994 erschienene, Werk [2, Seite 76ff] wurden verschiedene Pulverfördersysteme für die Laseroberflächenbehandlung untersucht. Dabei wurden drei Verfahren zur Pulverförderung vor allem auf eine Pulssierung des Pulverstrahls untersucht (Abb. 1). Die Systeme der Firma Plasme-Technik AG und der Firma Metco benötigten dabei eine größere Menge Fördergas. Das wird als Nachteil angesehen, da damit die Partikelgeschwindigkeit in der Schmelzzone sehr hoch ist. Bei diesen wurde deshalb zur weiteren Untersuchung ein Zyklonabscheider verwendet der vor dem Austreten der Pulverpartikel durch die Düse, das Pulver weitestgehend vom Fördergas trennte. Alle drei Varianten nutzen die Schwerkraft zur Dosierung des Pulvers. Mit Ausnahme von dem System vom IWS-Dresden, das speziell für die Laseroberflächenbehandlung entwickelt wurde, konnte eine Pulsation des Pulverstrahls mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera nachgewiesen werden. Diese war besonders bei einem hohen Fördergasdurchfluss V_T und

geringen Pulvermassenstrom \dot{m} besonders auffällig bzw. deren Frequenz hat mit zunehmendem Fördergasdurchfluss \dot{V}_T abgenommen bis dahin das der Pulverstrahl sichtlich unterbrochen war.

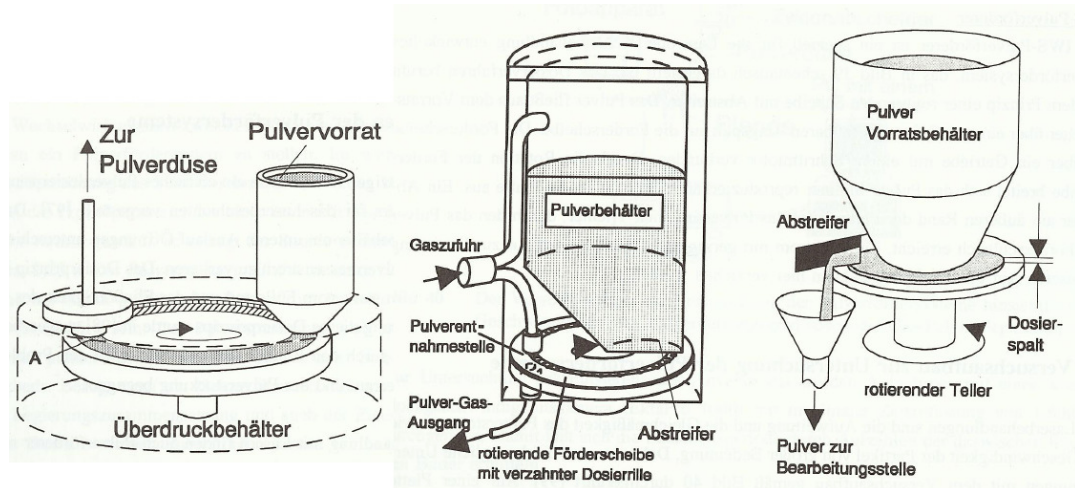


Abb. 1 Prinzipskizzen der 3 Pulverfördersysteme, von links nach rechts: der Twin-10-C der Firma Plasma-Technik AG; der MFP der Firma Metco; ein speziell von IWS entwickeltes Fördersystem für die Laseroberflächenbehandlung

Eine, vom Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, entwickelte Pulverdüse kombiniert eine Pulverdüse mit einer Schutzgasummantelung und einem integrierten Zyklonabscheider (Abb. 2). Diese bietet die Möglichkeit zwei verschiedenartige Pulver zuzuführen, sowie das zugehörige Fördergas beliebig an der Düse zu reduzieren. Zudem verfügt die Düse über eine auswechselbare Spitze, die die Verwendung verschiedene Düsenaustrittsdurchmesser ermöglichen. Zudem kann die Düse durch eine Zuführung von Kühlwasser gekühlt werden. [3]

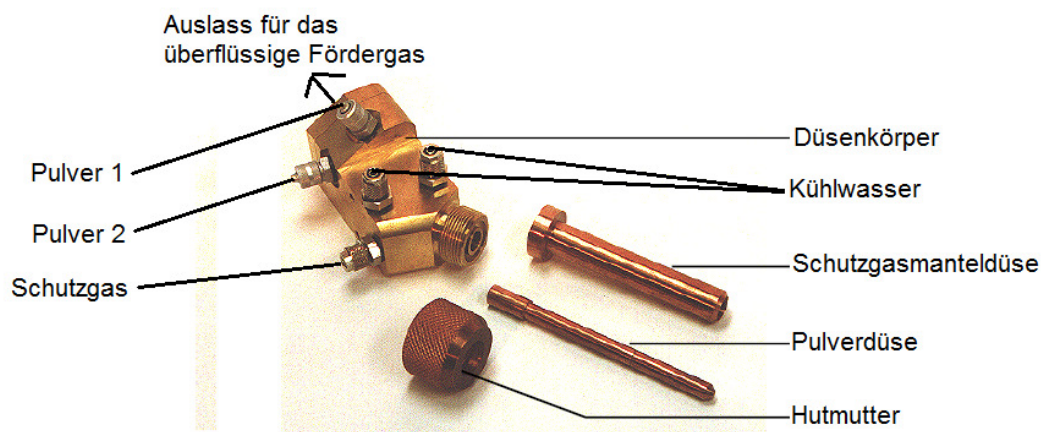


Abb. 2 Zyklonpulverdüse des IWS Dresden

4. Versuchsaufbau

4.1. Laseranlage

Die Laseranlage bestand aus einem Diodenlaser, der Firma Rofin vom Typ DF 025. Er hat eine maximalen Laserleistung von $P_L=2,5$ kW und einem Faseraustrittsdurchmesser von 1,5 mm, dessen Optik über ein 3-Achs-Portalsystem bewegt wurde. Zur Verfügung standen Optiken mit Brennweiten von $f_1=120$ mm und $f_2=200$ mm. Der Laser bestand aus 2 Diodenstacks. Dabei erzeugte einer der Stacks eine Wellenlänge $\lambda_1=808$ nm und der andere $\lambda_2=940$ nm. Beide Stacks konnten unabhängig voneinander mit Strom versorgt werden, wodurch eine Selektion der beiden Wellenlängen ermöglicht wurde.

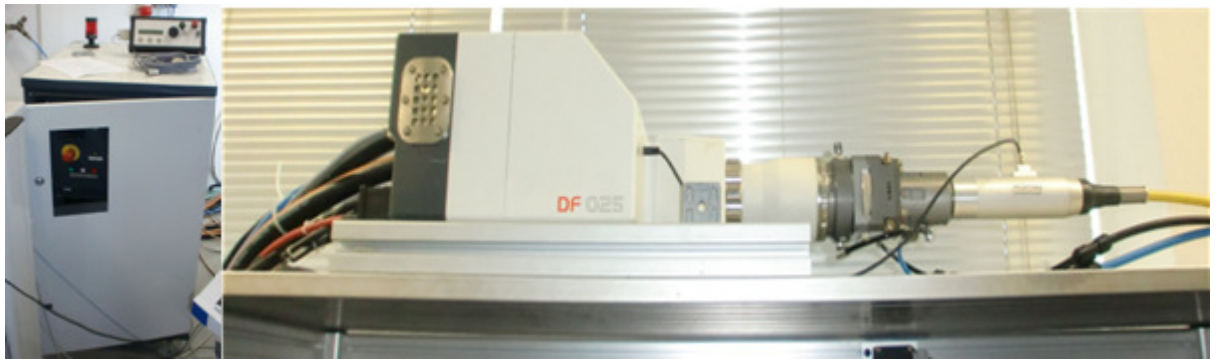


Abb. 3 Laserkopf (rechts) und Versorgungseinheit (links) des Rofin DF 025

An der Bearbeitungsstelle besaß der Laserstrahl eine Intensitätsverteilung die nahezu eine Top-Head-Verteilung war (Abb. 4 und Abb. 5). Der Fokussdurchmesser d betrug dabei für $f_1=120$ mm ca. $d_1=3$ mm und für $f_2=200$ mm ca. $d_2=5$ mm.

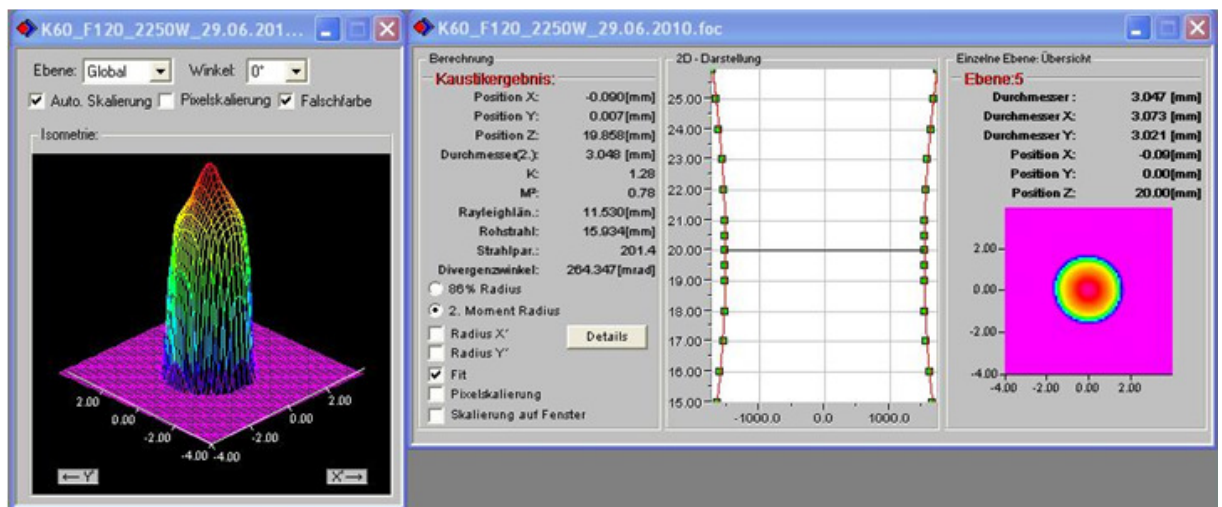


Abb. 4 Strahlprofil für Kollimation $f=60$ mm, Fokussierung $f_1=120$ mm

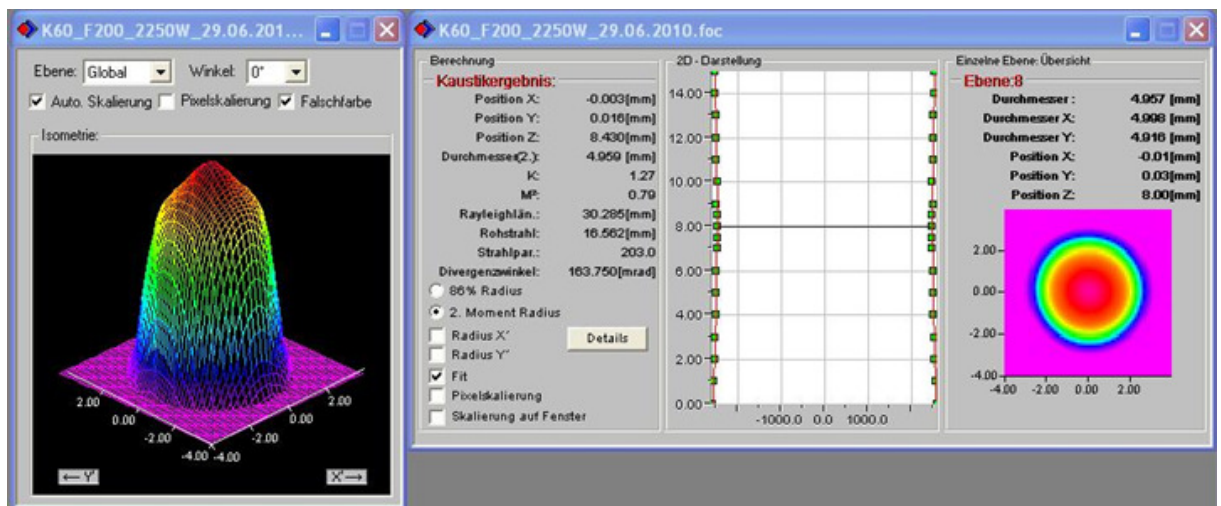


Abb. 5 Strahlprofil für Kollimation $f=60$ mm, Fokussierung $f_2=200$ mm

Die Einstellung der Laserleistung P_L erfolgte indirekt über den Diodenstrom I_G . Durch eine Leistungsmessung wurde den entsprechenden Diodenströmen I_G eine Laserleistung P_L zugeordnet (Abb. 6). Dabei wurde die eingestellte Stromstärke I_G immer zu gleichen Teilen an den beiden Diodenstacks angelegt.

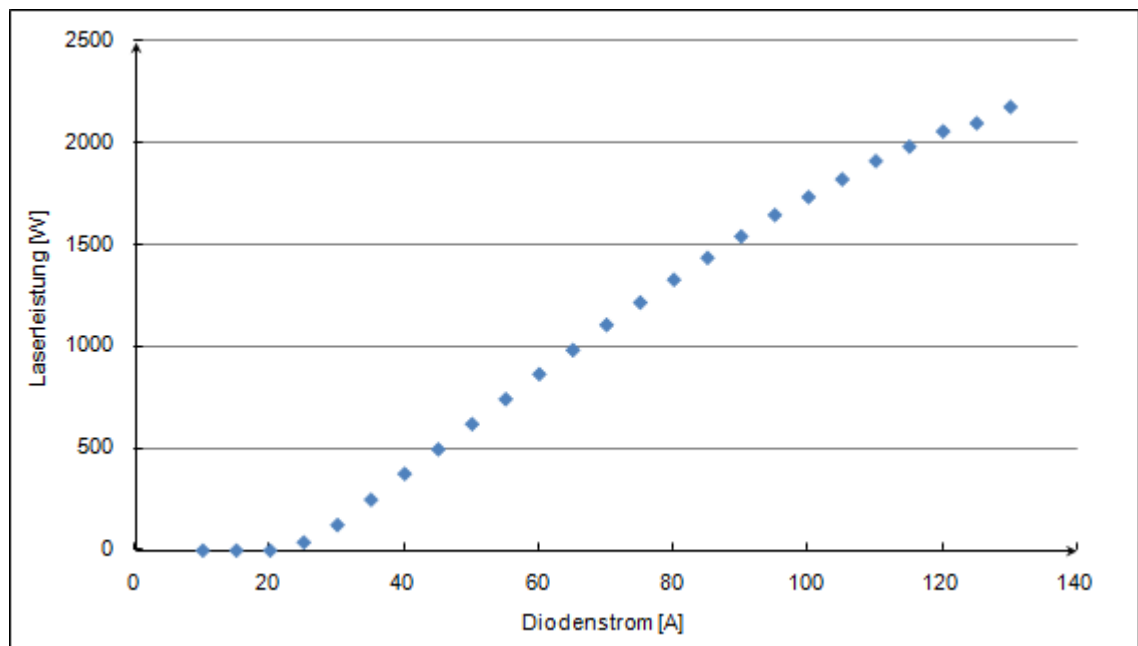


Abb. 6 Leistungsmessung des RoFin DF 025

4.2. Pulverförderer

Es wurde ein Pulverförderer der Firma GTV vom Typ MF-PF 2/2 (Abb. 7) verwendet. Er hat zwei Pulverbehälter die separat eingestellt werden konnten und förderten. Somit konnten zwei unterschiedliche Pulver in einem bestimmten Verhältnis gemischt oder der Pulvermassenstrom \dot{m} verdoppelt werden. Gefördert wurde nach folgendem Prinzip:

Wie in Abb. 1 links dargestellt, stand der gesamte Pulverbehälter und der Raum in dem der Drehteller mit der Pulverrinne sich befindet, unter Überdruck. Das Pulver fiel dabei über einen Abstreifer in die Pulverrinne, sodass die Pulverrinne vollständig gefüllt wurde. Am gegenüberliegenden Absauger wurde das Pulver durch das Fördergas mitgerissen und in den Pulverschlauch befördert. Der Pulvermassenstrom \dot{m} war dabei abhängig von der Drehzahl des Tellers. Um das gesamte Pulver bis hin zur höchsten Drehzahl von 10 Umdrehungen pro Minute sauber zu fördern, war ein Mindestfördergasdurchfluss von $\dot{V}_T = 5 \text{ l/min}$ nötig. Als Fördergas wurde Argon verwendet, da es als Inertgas sowohl die Bearbeitungsstelle als auch das Pulver selbst vor Oxidation schützt.

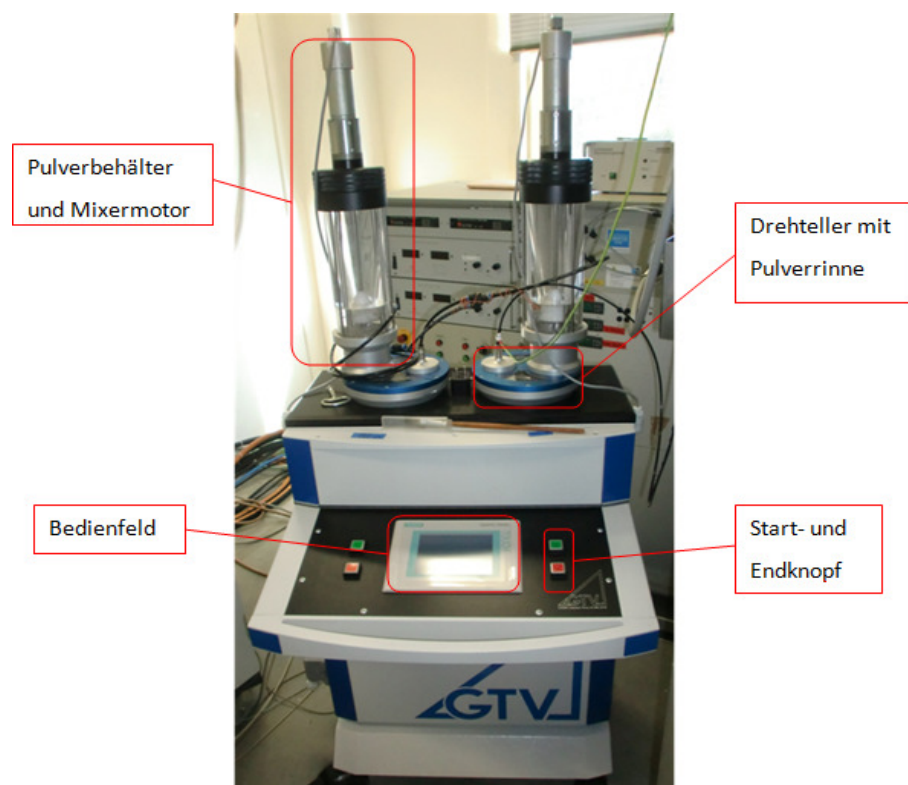


Abb. 7 Pulverförderer vom Typ MF-PF 2/2 von der Firma GTV

Da am Pulverförderer selbst nur die Tellerdrehzahl der Drehteller eingestellt werden konnte, wurde zu Beginn der Versuche der Pulvermassenstrom \dot{m} , der den entsprechenden Tellerdrehzahlen zuzuordnen ist, gemessen (Abb. 8). Dazu wurde der gesamte Pulverstrahl in ein zuvor gewogenes Gefäß geleitet. Das Gefäß war dabei an einer Seite mit Schaumstoff abgedichtet, sodass das Fördergas dadurch entweichen konnte, das Pulver jedoch vollständig im Gefäß verblieb. Es wurde bei der Messung über eine Zeit von 5 Minuten gemittelt. Dabei zeigte sich ein nahezu linearer Verlauf des Pulvermassenstromes \dot{m} über den gesamten Förderbereich.

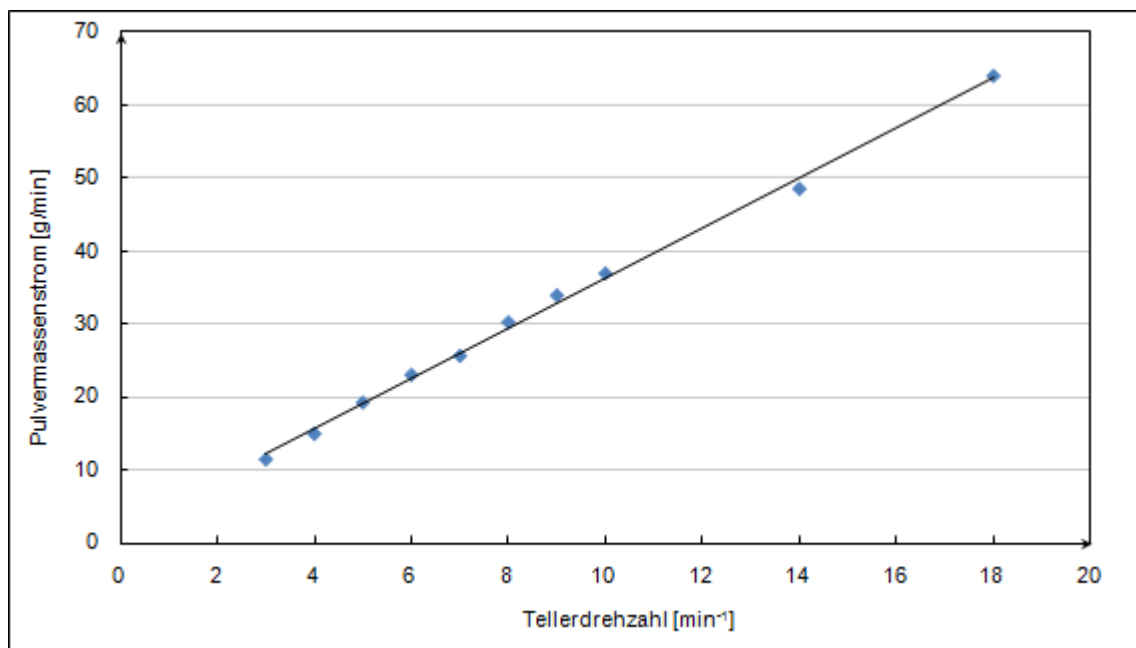


Abb. 8 Messung des Pulvermassenstromes \dot{m} für die entsprechenden Tellerdrehzahlen des Drehtellers

5. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

5.1. Der Pulverstrahl

Der Pulverstrahl beinhaltet folgende Komponenten:

- Das Pulver (die einzelnen Pulverpartikel können sich in Form und Größe sehr stark unterscheiden)
- Das Fördergas (es dient zur Förderung des Pulvers)
- Das Schutzgas (meist gleichzeitig das Fördergas, schützt die Bearbeitungsstelle vor Oxidation durch Luftsauerstoff)

Für die Versuche stand eine laterale Pulverdüse (Abb. 9) mit einer Schutzgasummantelung zur Verfügung. Diese lief zum Düsenaustritt hin konisch zu. Sie bestand aus zwei Düsen. In der inneren Düse wurde der Pulver-Gas-Strom geleitet, während in der äußeren Düse der Schutzgasstrom geleitet wurde. Dadurch wurde der Pulver-Gas-Strom auch nach dem Austritt aus der Düse stabilisiert und die Bearbeitungsstelle zusätzlich vor Luftsauerstoff geschützt. Als Schutzgas wurde, genau wie als Fördergas, Argon verwendet.

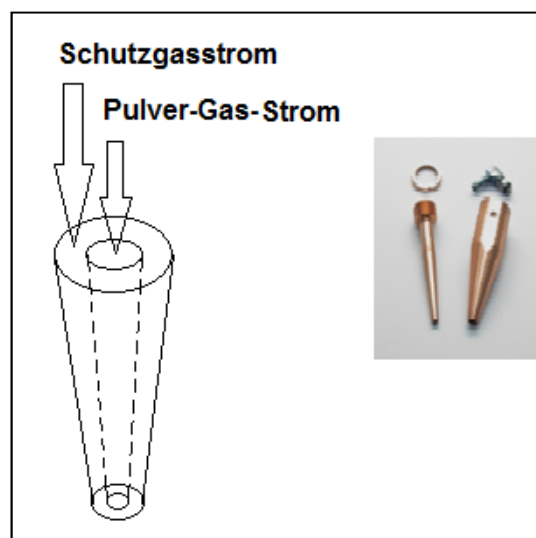


Abb. 9 Pulverdüse mit Schutzgasummantelung: Prinzipskizze (links) und Original (rechts)

5.1.1. Untersuchung der Pulverstrahlform

Es wurden drei Parameter untersucht die einen Einfluss auf die Pulverstrahlform und die Pulverpartikelgeschwindigkeit haben. Dabei war davon auszugehen, dass das Pulver immer die gleichen Eigenschaften hat. Das hieß, dass die Korngrößenverteilung, die Pulverpartikelform und die Zusammensetzung sich nicht veränderten. Im Zuge dieser Voraussetzung wurden folgende Parameter und deren Einfluss auf die Pulverstrahlform untersucht:

- Der Fördergasdurchfluss \dot{V}_T
- Der Pulvermassenstrom \dot{m} und
- Der Durchfluss der Schutzgasummantelung \dot{V}_S

Der Ablauf der Untersuchungen und deren Ergebnisse werden im Weiteren dargestellt.

Der Ablauf

Für die Versuche wurde die Pulverdüse senkrecht ausgerichtet. Mit einer Spiegelreflexkamera wurden Aufnahmen des Pulverstrahls gemacht. Es wurde eine Belichtungszeit von 2,5 Sekunden gewählt um den Pulverstrahl deutlich sichtbar zu machen. Neben der Divergenz des Pulverstrahls wurde er außerdem noch nach seiner Dichte beurteilt. Je höher die Partikeldichte im Pulverstrahl ist desto mehr wird er das Substrat gegen den Laserstrahl abschirmen und selbst die Energie des Laserstrahls aufnehmen.

Die Versuche wurden alle ohne weitere Einflussfaktoren durchgeführt. Das bedeutet es wurde kein Substrat an die Bearbeitungsstelle gelegt und auch kein Crossjet und keine Absaugung verwendet, um den Pulverstrahl nicht weiter zu beeinflussen. Mögliche Auswirkungen der Absaugung lassen sich nur abschätzen. Der Pulverstrahl könnte geringfügig in Richtung der Absaugung abgelenkt werden bzw. die Divergenz in diese Richtung könnte größer sein. Da der verwendete Druck bei der Absaugung jedoch relativ gering gegenüber dem Durchfluss der Schutzgasummantelung \dot{V}_S war wurde dieser Fehler vernachlässigt. Der Crossjet war oberhalb der Pulverdüse angebracht, wodurch dessen Einfluss bei der Bearbeitung nur sehr gering eingeschätzt wurde.

Der Fördergasdurchfluss V_T

Das Fördergas diente zum Transport des Pulvers vom Pulverförderer zur Bearbeitungsstelle. Es blies die Pulverpartikel über ein Schlauch- oder Rohrsystem vom Pulverförderer bis zur Bearbeitungsstelle. Dies war durch den vorhandenen Aufbau nötig da zum Teil Höhenunterschiede überwunden werden mussten, weil der Pulverförderer, durch seine Größe, nicht mit an der Optik befestigt werden konnte. Dabei erhielten die Pulverpartikel eine Geschwindigkeit, die damit auch den bedeutendsten Einfluss des Fördergases darstellte. Bei einem höheren Fördergasdurchfluss V_T verringerte sich die Dichte des Pulverstrahls (Abb. 10). Das zeigte, dass sich damit die Partikelgeschwindigkeit der Pulverpartikel erhöht hat. Sie bleiben somit eine kürzere Zeitspanne im Laserstrahl bevor sie auf das Substrat auftrafen. Dadurch war die Energieeinbringung auf jedes einzelne Pulverpartikel geringer als bei einem kleineren Fördergasdurchfluss V_T . Es war zu vermuten, dass sie aus diesem Grund noch sehr hart waren sobald sie auf das Substrat trafen und davon häufiger abprallten. Das führt zum Absinken des Pulvernutzungsgrades η und es musste ein größerer Sicherheitsaufwand betrieben werden, da mehr Pulver nicht verarbeitet wurde sondern in die Luft gelangte. Um dies zu vermeiden wird dann eine bessere Absaugung benötigt.

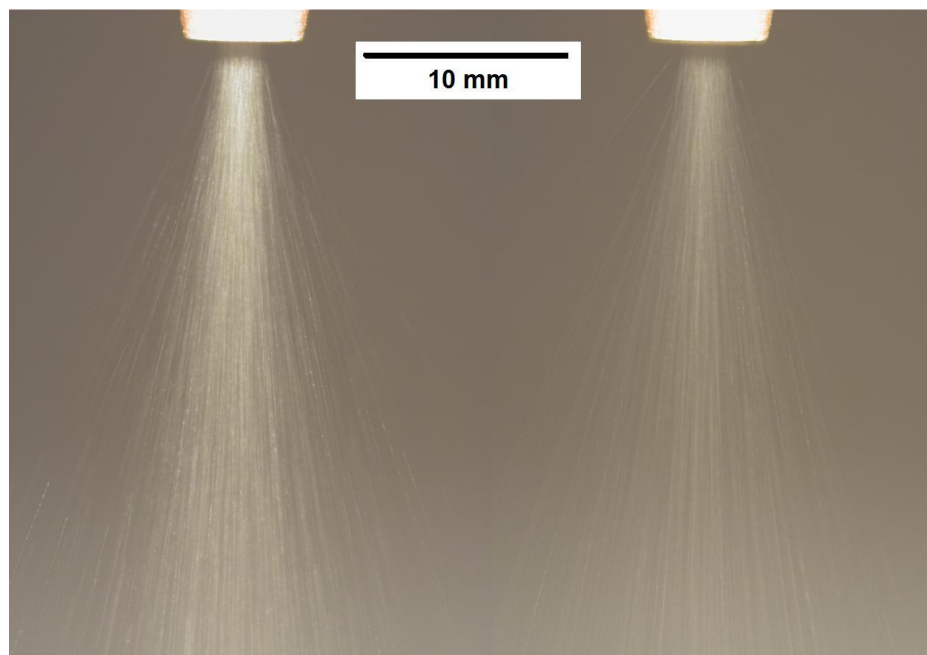


Abb. 10 Pulverstrahl bei einer Pulvermassenstrom $\dot{m}=15,5$ g/min und einem Fördergasdurchfluss $V_T=2$ l/min (links) und $V_T=8$ l/min (rechts)

Der Pulvermassenstrom \dot{m}

Der Pulvermassenstrom \dot{m} hatte nur einen sehr geringen Einfluss auf die Pulverstrahlform. Er sorgte dafür, dass sich die Breite des Pulverstrahls geringfügig veränderte. Je mehr Pulver gefördert wurde desto breiter wurde der Pulverstrahl. Der größere Einfluss war jedoch in der Dichte des Pulverstrahls zu sehen (Abb. 11). Bei einem höheren Pulvermassenstrom \dot{m} nahm diese deutlich zu. Damit nahm die Absorption des Laserstrahls im Pulverstrahl und damit auch dessen Abschirmung zum Substrat zu. Die Pulverpartikel bilden dabei nicht nur Absorptions- sondern auch Streuzentren. Der Laserstrahl wurde bei einer sehr hohen Pulverdichte nur durch Mehrfachreflexion an den Pulverpartikeln zum Substrat geleitet. Er wurde also bedeutend abgeschwächt und konnte das Substrat nicht mehr so stark erwärmen. Dadurch sank bei der Laserbearbeitung die Wurzeltiefe t der Auftragschweißspuren. Bei einer zu geringer Laserleistung P_L die das Substrat erreichte nahm aber auch die Anbindung der Auftragschweißspur an das Substrat ab.

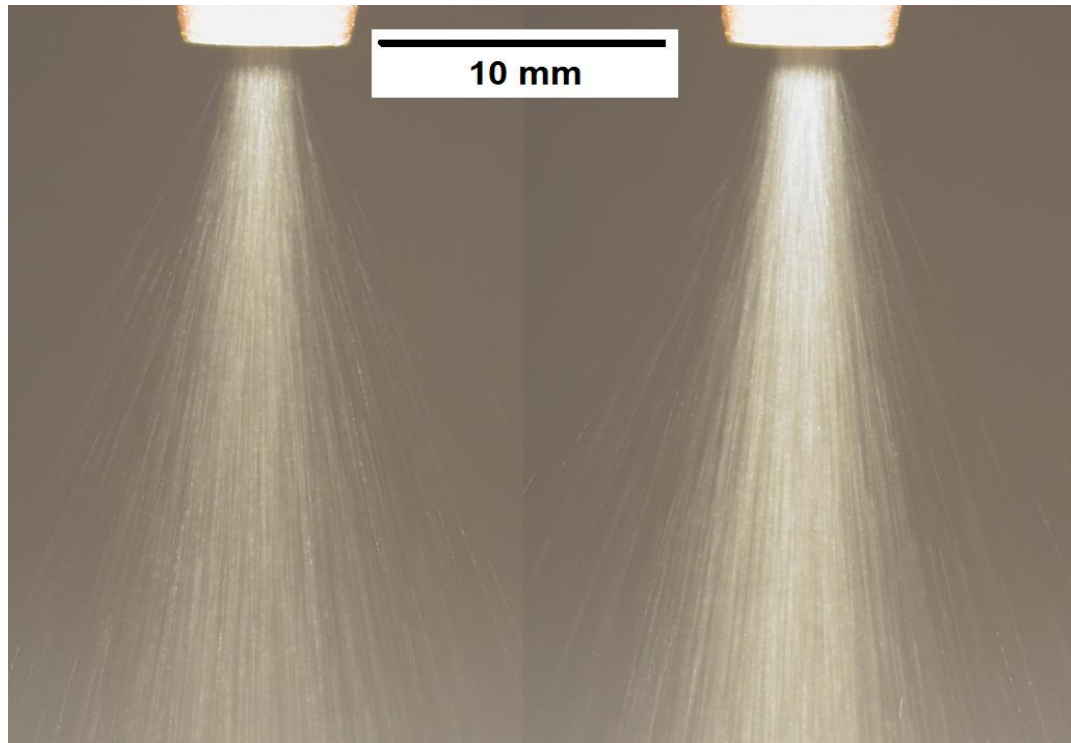


Abb. 11 Pulverstrahl bei einer Fördergasdurchfluss $V_T=2$ l/min und einem Pulvermassenstrom $\dot{m}=6,7$ g/min (links) und $\dot{m}=28,1$ g/min (rechts)

Der Durchfluss der Schutzgasummantelung V_s

Der Durchfluss der Schutzgasummantelung V_s zeigte die größten Auswirkungen auf die Pulverstrahlform. Er beeinflusste erheblich seine Divergenz und damit seine Dichte. Mit einem geringer divergierenden Pulverstrahl konnte der Bearbeitungsabstand vergrößert werden oder ein kleinerer Laserstrahlfokus d verwendet werden. Somit könnten feinere Strukturen aufbauen werden. In Abb. 12 wurde der Einfluss des Durchflusses der Schutzgasummantelung V_s dargestellt. Zu sehen sind Pulverstrahlen bei denen der Durchfluss der Schutzgasummantelung V_s schrittweise erhöht wurde. Es zeigte sich, dass mit zunehmendem Durchfluss der Schutzgasummantelung V_s der Divergenzwinkel abnahm und die Dichte des Pulverstrahls zunahm.

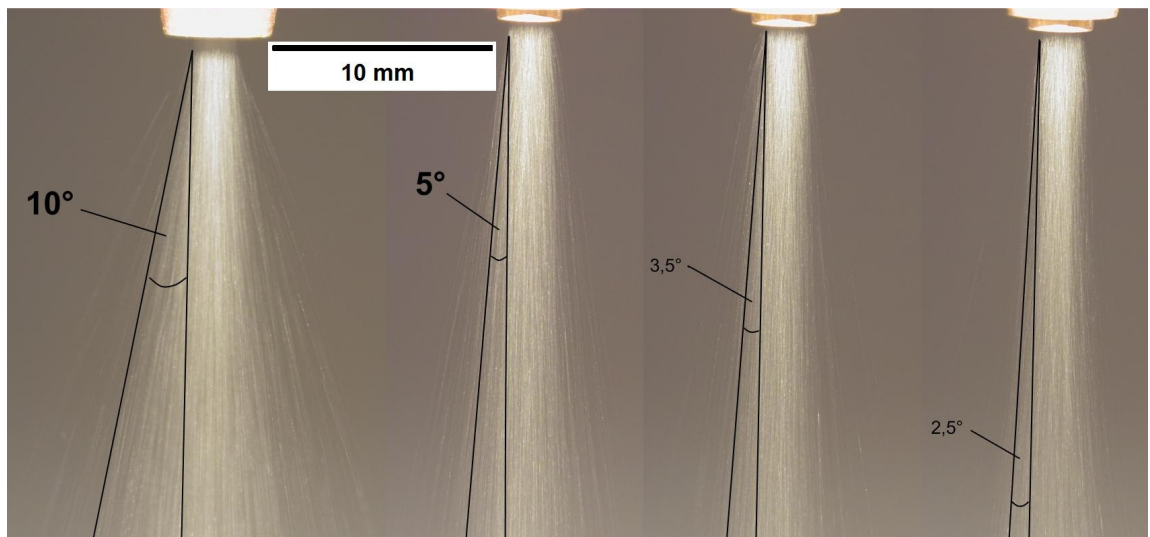


Abb. 12 Pulverstrahl mit geschätztem Divergenzwinkel und mit zunehmendem Durchfluss der Schutzgasummantelung V_s , von links nach rechts: 0 l/min, 12,5 l/min, 15 l/min, 17,5 l/min

Zusammenfassung

Zusammenfassend ließ sich sagen, dass ein hoher Fördergasdurchfluss V_T ungünstig für eine Bearbeitung war, da er die Dichte des Pulverstrahls stark reduziert. Es war bei einem so hohen Fördergasdurchfluss V_T nur mit einem sehr hohen Durchfluss der Schutzgasummantelung V_S möglich den Divergenzwinkel des Pulverstrahls soweit zu reduzieren, dass der Pulverstrahlfokus an der Bearbeitungsstelle, trotz eines angemessenen Bearbeitungsabstandes, in etwa so groß war wie der Fokusbereich d des Laserstrahls. Durch einen so hohen Durchfluss der Schutzgasummantelung V_S wurde, die sich ausbildende Schmelze an der Bearbeitungsstelle weggedrückt und die Bearbeitung war nicht mehr möglich. Das bedeutet, dass eine Methode oder Vorrichtung entwickelt werden, durch die der Fördergasdurchfluss V_T vor oder innerhalb der Pulverdüse deutlich reduziert werden konnte.

5.1.2. Veränderung der Pulverstrahlform

Da sich in den Versuchen zeigte, dass der Fördergasdurchfluss V_T den größten Einfluss auf den Wirkungsgrad hatte, wurde eine spezielle Vorrichtung (Abb. 13) entworfen. Im Weiteren wird die Vorrichtung als Gasdruckminimierung bezeichnet. Sie reduziert den Fördergasdurchfluss V_T und damit die Pulverpartikelgeschwindigkeit kurz vor der Düse erheblich. Dabei wurde der Pulver-Gas-Strom in eine kegelförmige Vorrichtung geleitet, deren obere Öffnung mit Schaumstoff abgedichtet wurde. Das Pulver fiel aufgrund der Schwerkraft von selbst nach unten. Der Großteil des Fördergases wurde jedoch nach dem Prinzip des geringsten Widerstandes durch den Schaumstoff nach oben abgeleitet. Somit traten die Pulverpartikel, die kurz nach dem Passieren der Vorrichtung in die Düse gelangten, fast nur noch unter der Wirkung der Schwerkraft aus der Düse. Damit wurde mit der Vorrichtung der Gasdruckminimierung die Partikelgeschwindigkeit und auch das durch die Düse austretende Fördergas auf ein Minimum reduziert. Mit Hilfe dieser Vorrichtung war es möglich auch mit einem geringeren Durchfluss der Schutzgasummantelung V_S den Divergenzwinkel des Pulverstrahls soweit zu reduzieren wie zuvor erwähnt.

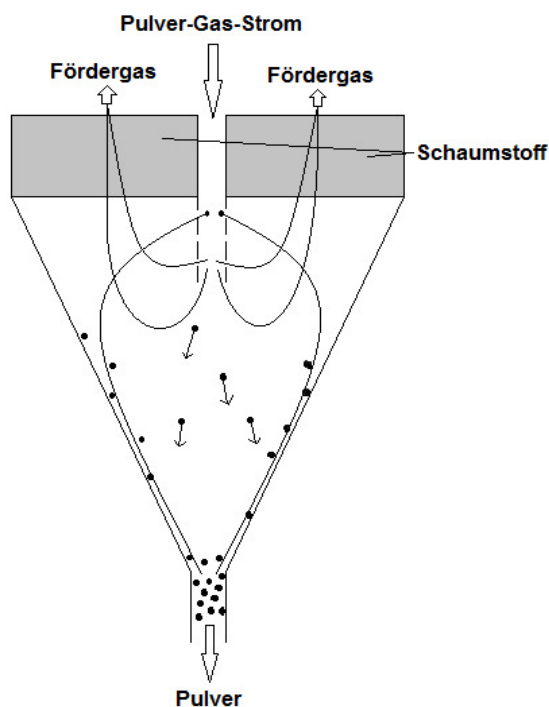


Abb. 13 Prinzip der Gasdruckminimierung (links) und montierte Gasdruckminimierung (rechts)

Abb. 14 zeigt den Pulverstrahl mit Gasdruckminimierung bei unterschiedlichen Durchflüssen der Schutzgasummantelung V_S . Es zeigte sich bereits bei sehr geringem bzw. keinem Durchfluss eine deutliche Verringerung des Divergenzwinkels. Weiterhin wurde mit dieser Vorrichtung erreicht, dass mit einem geringeren Durchfluss der Schutzgasummantelung V_S der Pulverstrahl um ein Vielfaches besser fokussiert werden konnte. Zudem hatte die Dichte des Pulverstrahls deutlich zugenommen, wodurch bei einer Bearbeitung der Laserstrahl durch den Pulverstrahl deutlich mehr abgeschirmt wurde als ohne Gasdruckminimierung. Auch die Wechselwirkungszeit der Pulverpartikel mit dem Laserstrahl vor dem Auftreffen auf dem Substrat ist durch die verringerte Partikelgeschwindigkeit deutlich höher.

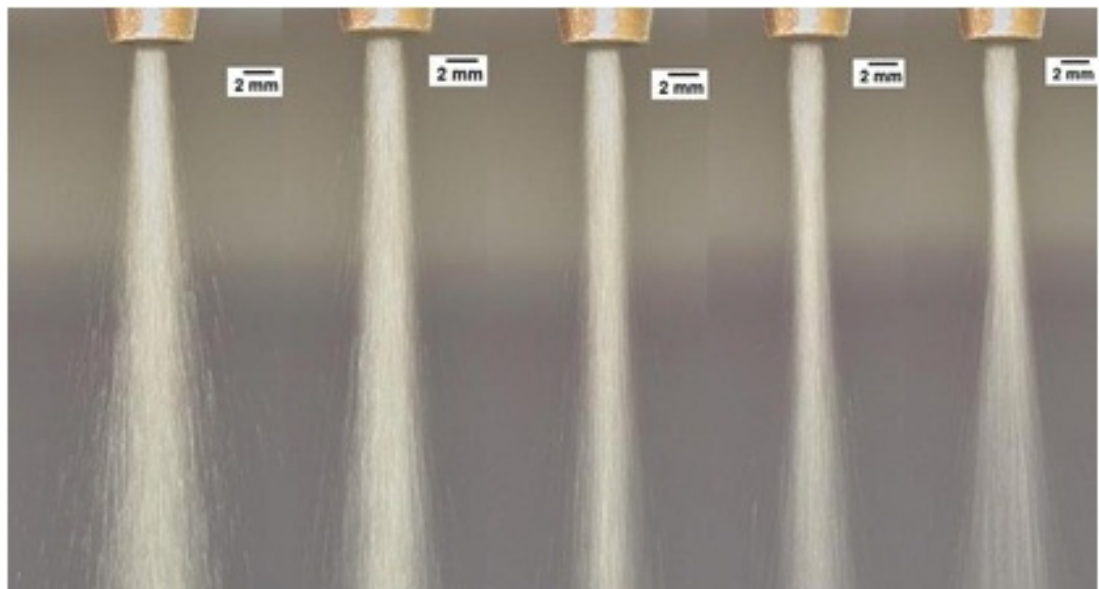


Abb. 14 Pulverstrahl vorgeschalteter Gasdruckminimierung mit zunehmendem Durchfluss der Schutzgasummantelung V_S , von links nach rechts in 2,5 l/min-Schritten von 0 l/min bis 10 l/min

In Abb. 15 ist der Pulverstrahl bei unterschiedlichen Parametern jeweils mit und ohne Gasdruckminimierung gegenüber dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Divergenz des Pulverstrahls wesentlich verringert wurde und die Dichte des Pulverstrahls zugenommen hatte. Zudem hatte sich aufgrund des, nun nur noch sehr geringen Fördergasdurchflusses V_T , die Partikelgeschwindigkeit der Pulverpartikel deutlich reduziert.

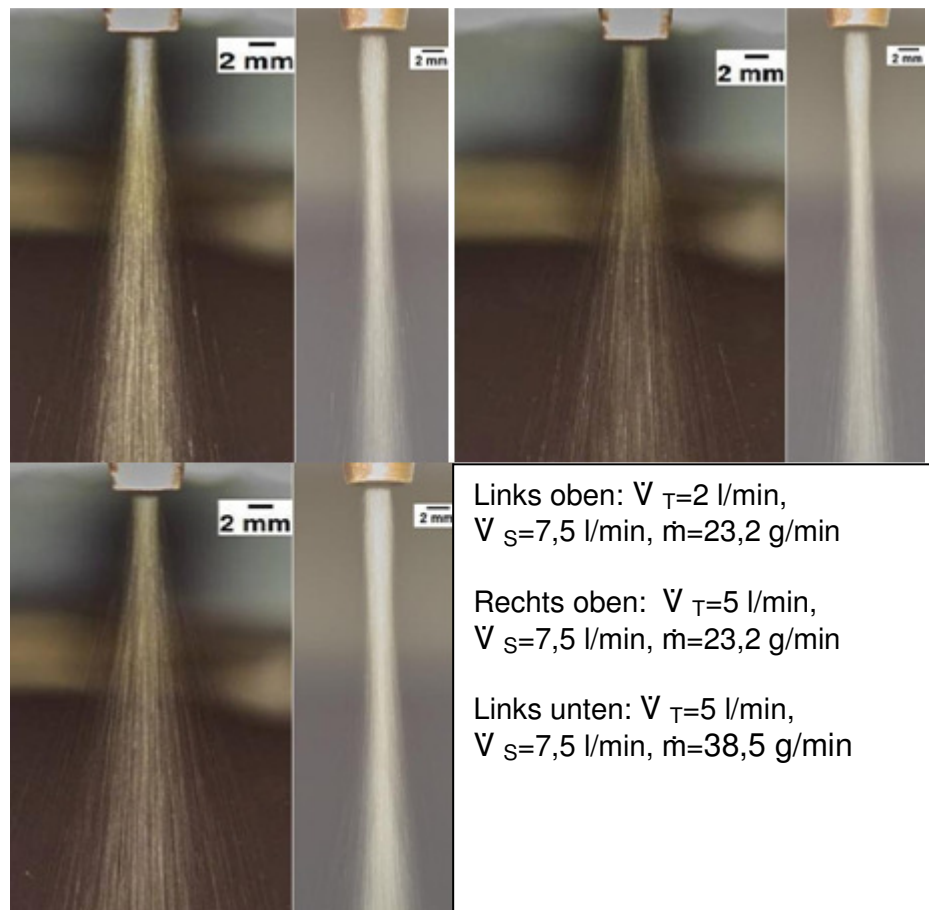


Abb. 15 Vergleich des Pulverstrahls mit und ohne Gasdruckminimierung bei verschiedenen Parametern

Die fast vollständige Trennung von Pulver- und Fördergasstrom erfordert jedoch die externe Zuführung von Schutzgas bzw. eine vollständige Schutzgasatmosphäre zwingend notwendig. Das fehlende Schutzgas wurde in diesem Fall durch die Schutzgasummantelung bereitgestellt. Sie stabilisierte den Pulverstrahl gleichzeitig noch. Durch die Ummantelung konnte der Pulverstrahl ausgerichtet werden. Ohne Schutzgasummantelung beschrieben die Pulverpartikel eine Wurfparabel sobald die Düse nicht mehr vertikal ausgerichtet war. Sie wurde durch die Schutzgasummantelung so weit linearisiert, dass die Pulverpartikel sich über den gesamten Bearbeitungsabstand hinweg linear fortbewegten.

5.2. Der Pulvernutzungsgrad η

Bei allen nachfolgend beschriebenen Versuchen wurde ein NiBSi-Pulver der Firma GTV verwendet. Es lag in einem Korngrößenbereich von 20 μm bis 120 μm und bestand aus überwiegend sphärischen Pulverpartikeln. Als Substrate wurde ein Werkzeugstahl mit der Bezeichnung X155CrVMo12.1 (Werkstoffnummer: 1.2379) verwendet. Es wurden Substratstücke mit den Abmaßen von 40 x 15 x 8,8 mm (L x B x H) erzeugt. Die Auftragschweißspuren reichten dabei über die gesamte Substratbreite von 40 mm. Bei einer Bearbeitungslänge von 70 mm lagen damit der Beschleunigungsbereich und auch der Bremsbereich der Portalanlage nicht auf dem Substrat und hatten dadurch keine Auswirkung auf den Pulvernutzungsgrad η . Nach der Spurerzeugung wurden die Substrate mit Hilfe der SPB33-Waage von ScalTech, mit einer Genauigkeit von 0,1 mg, gewogen. Anschließend konnte mit Hilfe der Bearbeitungsgeschwindigkeit v , der Spurlänge l und der Pulvermassenstrom \dot{m} die insgesamt eingebrachte Pulvermenge berechnet werden. Zusammen mit der Differenz des Gewichtes der Substrate vor und nach dem Spurauftrag ließ sich der Pulvernutzungsgrad η berechnen.

$$\eta = \frac{\Delta m_{\text{Substrat}}}{\frac{40 \text{ mm}}{v} \cdot \dot{m}}$$

Der Pulvernutzungsgrad η war das Verhältnis zwischen der verarbeiteten und eingebrachten Pulvermenge. Ziel in dieser Arbeit war es diesen zu maximieren. Dazu wurde zuerst untersucht, welche Parameter Einfluss auf den Pulvernutzungsgrad η haben.

5.2.1. Einflussparameter auf den Pulvernutzungsgrad η

Folgende Parameter wurden auf ihren Einfluss auf den Pulvernutzungsgrad η untersucht:

- Die Laserleistung P_L
- Die Bearbeitungsgeschwindigkeit v
- Der Fördergasdurchfluss V_T (ohne Gasdruckminimierung)
- Die Gasmenge der Schutzgasummantelung V_S
- Die Pulvermassenstrom \dot{m}

Die Ergebnisse sollen nun im Weiteren vorgestellt werden.

Zu beachten ist, dass bei allen nachfolgenden Versuchen bereits die Gasdruckminimierung eingesetzt wurde.

Die Laserleistung P_L :

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Pulvermassenstrom $\dot{m} = 38,5 \text{ g/min}$
- Bearbeitungsgeschwindigkeit $v = 45 \text{ mm/s}$
- Durchfluss der Schutzgasummantelung $V_S = 7,5 \text{ l/min}$
- Fördergasdurchfluss $V_T = 5 \text{ l/min}$

Bei den Untersuchungen zur Laserleistung P_L wurden Auftragschweißspuren mit einer schrittweise steigenden Laserleistung P_L erzeugt. Da die Laserleistung P_L nur indirekt über den Diodenstrom I_G der Laserdioden steuerbar war, wurde dieser in Schritten von 10 A von 70 auf 120 A erhöht. Die Untergrenze wurde dabei durch die niedrigste Laserleistung P_L bestimmt bei der eine Auftragschweißspur erzeugt werden konnte. Die Obergrenze wurde von der maximalen Laserleistung P_L bestimmt. Daraus ergibt sich eine Leistungsspanne von rund einem Kilowatt in dem Experimente durchgeführt werden konnten.

In Abb. 16 ist die Abhängigkeit des Pulvernutzungsgrades η von der Laserleistung P_L aufgetragen. Es zeigte sich ein monoton steigender Verlauf der jedoch nicht linear zu

sein scheint. Der Anstieg des Graphen nahm mit zunehmender Laserleistung P_L zu. Bei der höchsten Laserleistung P_L war damit auch der Pulvernutzungsgrad η am höchsten, weshalb bei späteren Versuchen immer mit der maximalen Laserleistung P_L gearbeitet wurde.

Ein Ausreißer ist bei dem vorletzten Messwert aufgetreten. Der war dadurch zu erklären, dass bei der Bestimmung des Pulvernutzungsgrades η teilweise Ungenauigkeiten aufgetreten konnten. Bei der Spurerzeugung war es vorgekommen, dass sich an den Substraträndern Überhänge gebildet hatten. Die wurden nachfolgend versucht so gut wie möglich zu entfernen. Das war nicht immer erfolgreich. Es kam auch vor das Teile der Auftragschweißspur mit abgeplatzt sind. Weiterhin waren Pulverpartikel an der Oberseite der Auftragschweißspur angeschmolzen. Die losen Pulverpartikel, die sich nach dem Prozess noch auf der Auftragschweißspur und dem Substrat befanden, wurden mit Hilfe eines Pinsels entfernt. Die angeschmolzenen Pulverpartikel konnten auf diese Weise nicht entfernt werden. Zudem gab es Schwankungen im Pulvermassenstrom \dot{m} , auf die später näher eingegangen wird (siehe Seite 20 ff). Aus diesem Grund ist ein gewisser Toleranzbereich bei dem Pulvernutzungsgrad η zu beachten. Da jedoch dessen Größe nicht abgeschätzt werden konnte, wurde auf eine Darstellung dessen im Diagramm verzichtet.

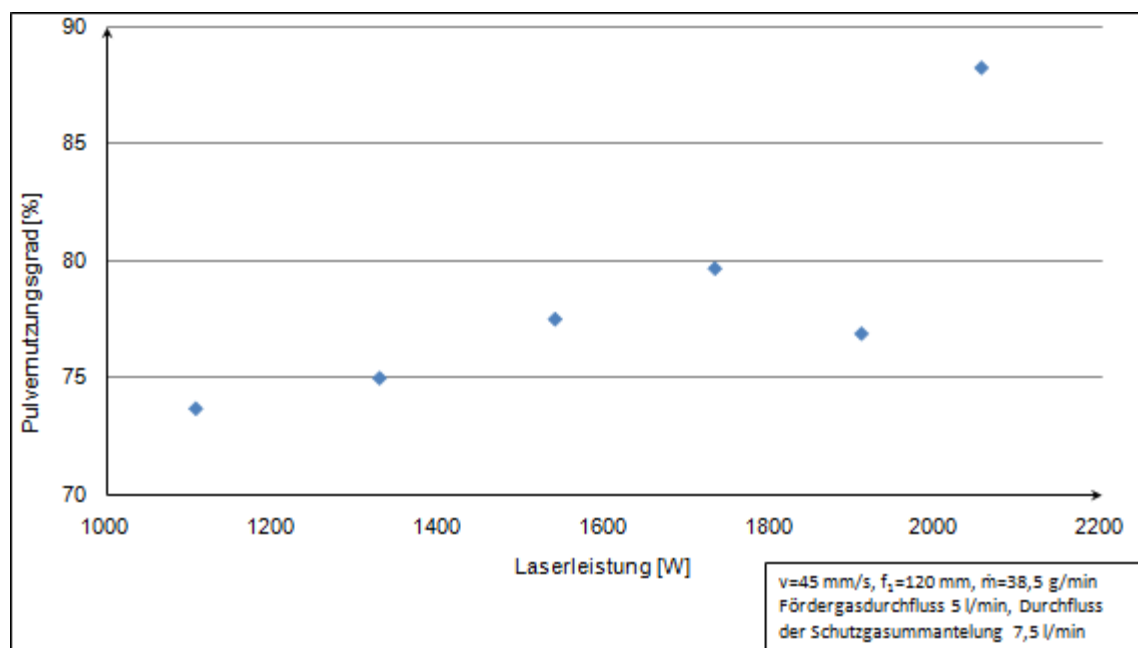


Abb. 16 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung der Laserleistung P_L

Mit zunehmender Laserleistung P_L nahm nicht nur der Pulvernutzungsgrad η zu. Es nahmen zugleich die Spurbhöhe h , Spurbbreite b und die Wurzeltiefe t zu. Die Wurzeltiefe t nahm jedoch nur am geringsten zu. Ursache dafür war vermutlich, dass die Versuche bei einem sehr hohen Pulvermassenstrom \dot{m} durchgeführt wurden. Das führte zu einer geringen, wenn überhaupt vorhandenen, Wurzeltiefe t . Vielmehr ist es besser davon zu sprechen, dass die Anbindung der Auftragschweißspur mit zunehmender Laserleistung P_L zunahm. Denn die Auftragschweißspuren mit geringer Laserleistung P_L wiesen eine sehr geringe Anbindung an das Substrat auf und waren teilweise unterbrochen (Abb. 17).

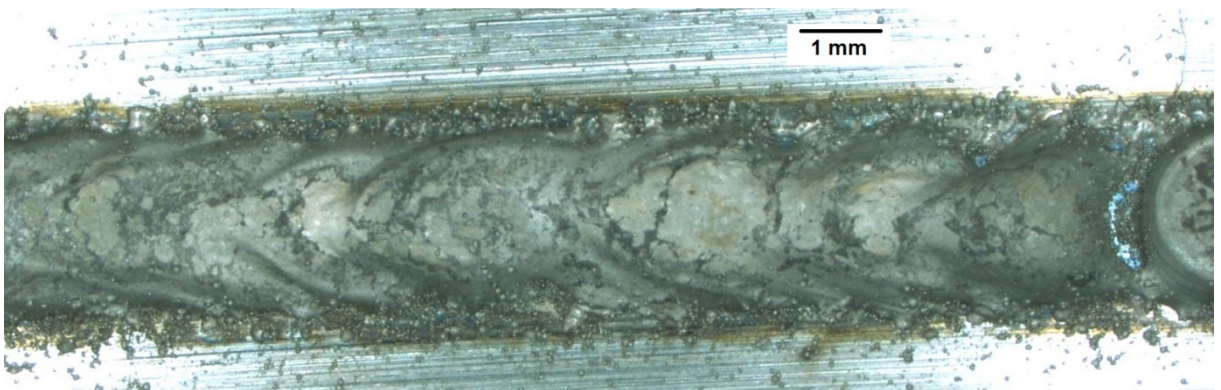


Abb. 17 Auftragschweißspur bei zu hoher Pulvermassenstrom \dot{m} und zu geringer Laserleistung P_L

Bei weiterer Reduzierung der Laserleistung P_L , bildete sich zunehmend eine Schuppenstruktur heraus, bis hin zu Unterbrechungen in der Auftragschweißspur. Zum Teil wurden dabei nur noch vereinzelt Pulverpartikel bzw. größere Schmelzperlen, ohne Zusammenhang, auf dem Substrat angebunden (Abb. 18).

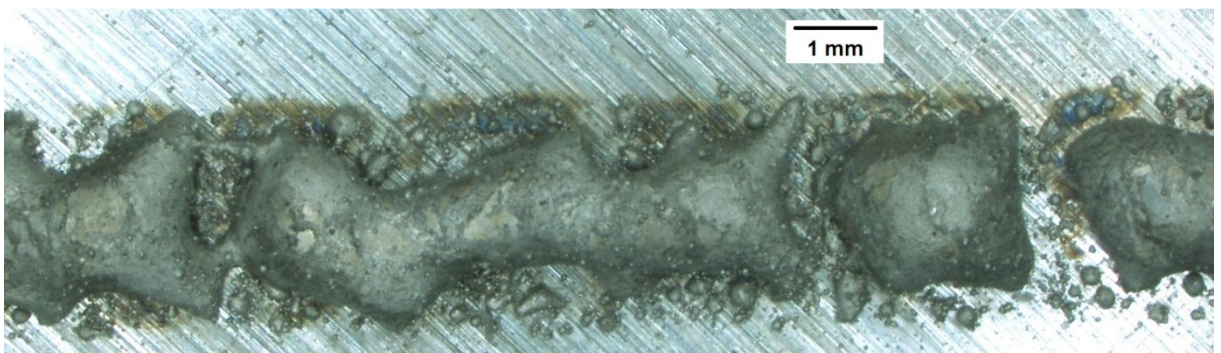


Abb. 18 Auftragschweißspur bei zu hoher Pulvermassenstrom \dot{m} und viel zu geringer Laserleistung P_L

Da dadurch auch der Pulvernutzungsgrad η selbst bei geringsten Leistungen nicht merklich abfiel, musste zusätzlich noch die Spurbeschaffenheit als Kriterium für weitere Versuche verwendet werden. Bei der Betrachtung des Pulversättigungsgrades wurde das besonders beachtet (siehe Kapitel 5.3.).

Die Bearbeitungsgeschwindigkeit v :

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Pulvermassenstrom $\dot{m}=38,5$ g/min
- Laserleistung $P_L=2055$ W
- Durchfluss der Schutzgasummantelung $\dot{V}_S=7,5$ l/min
- Fördergasdurchfluss $\dot{V}_T=5$ l/min

Bei der Untersuchung zum Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v wurden Auftragschweißspuren mit einer schrittweise steigenden Bearbeitungsgeschwindigkeit v erzeugt. Die wurde dabei von 20 mm/s bis 100 mm/s in 5mm/s-Schritten erhöht. Obergrenze bildete die maximale Verfahrgeschwindigkeit des Portalsystems. Eine geringere Geschwindigkeit wurde nicht gewählt um eine zu starke Erwärmung und damit mögliche Verschmutzung der Optik bzw. des Schutzglases zu vermeiden.

In Abb. 19 ist der Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung der Bearbeitungsgeschwindigkeit v dargestellt. Es zeigte sich ein zur x-Achse nahezu paralleler Verlauf über den gesamten Parameterbereich. Daraus war zu schließen, dass kein Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v auf den Pulvernutzungsgrad η besteht.

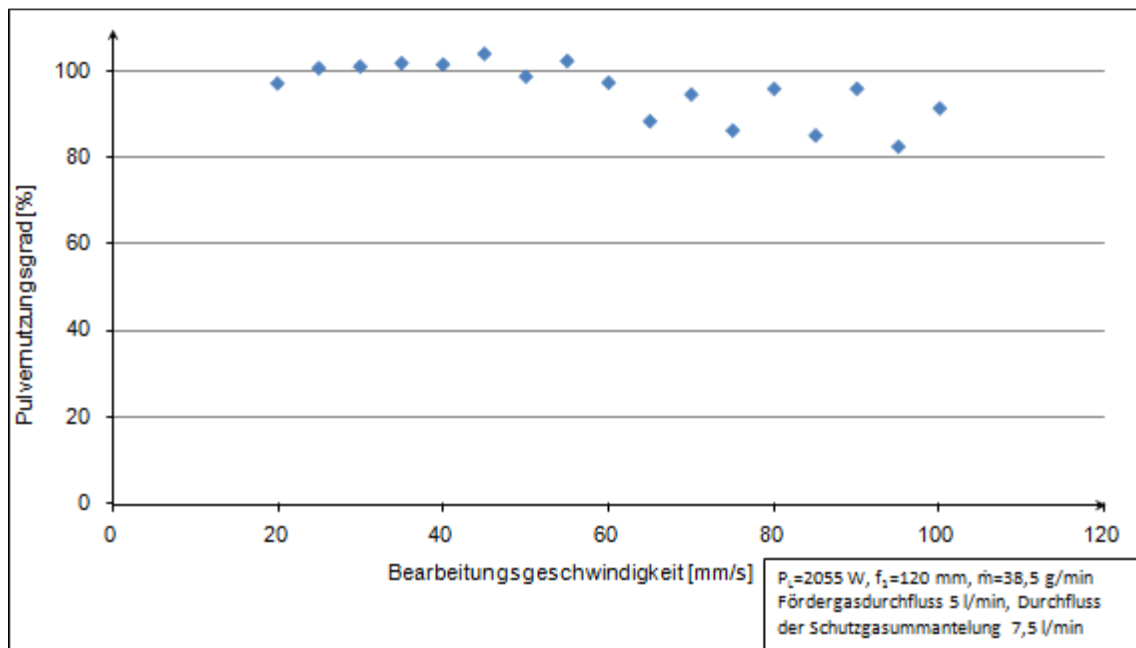


Abb. 19 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit

Weiterhin ist zu sehen, dass ein Teil der Messwerte die 100 % überschreitet. Dies ist vermutlich auf bereits zuvor beschriebene Messungenauigkeiten und Schwankungen der Pulvermassenstrom \dot{m} zurückzuführen. Ein zu ihrer Untersuchung extra bestelltes Messgerät registrierte Schwankungen im Pulvermassenstrom \dot{m} und gab diese als ein Spannungssignal aus. Es konnte mit Hilfe eines Oszilloskops erfasst werden. In Abb. 20 ist ein solches Signal dargestellt. Zu sehen ist ein Zeitraum von 10 s. Es zeigen sich Schwankungen des Messsignals mit einem Spitze-Spitze-Wert von ca. 0,5 V und Frequenzen von minimal 1 Hz. Die Bearbeitungszeit zur Spurerzeugung im Vergleich dazu betrug zwischen ca. 0,4 bis 2 s. Ob dies der Grund für eventuelle Schwankungen der Spurhöhe h ist konnte jedoch nicht in Erfahrung gebracht werden.

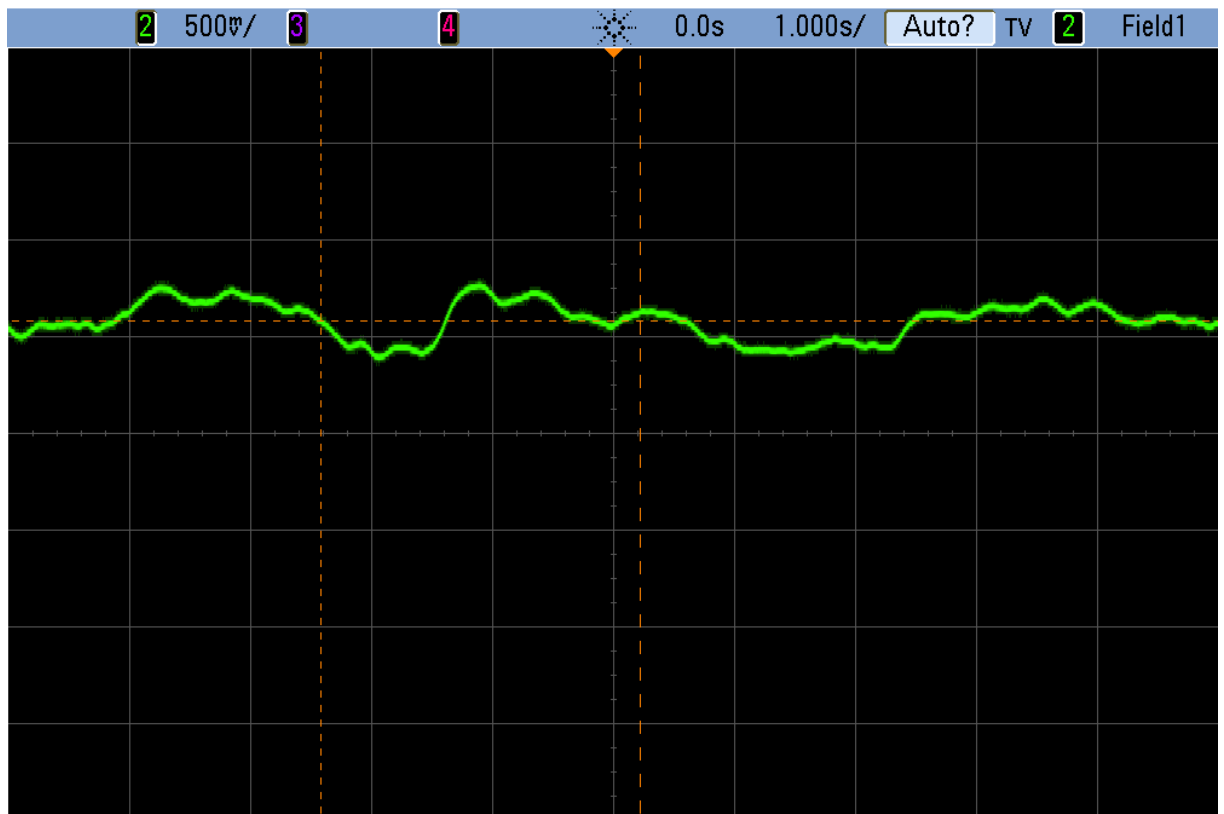


Abb. 20 Verlauf des Spannungssignals auf dem Oszilloskop zur Bestimmung von Schwankungen in der Pulvermassenstrom \dot{m}

Bei den Auftragschweißspuren mit der geringsten Bearbeitungsgeschwindigkeit v war noch etwas anderes zu beobachten. Sie waren sehr glatt, d.h. es gab so gut wie keine Pulveranhaftungen. Besonders ausgeprägt war dies bei der Auftragschweißspur mit der Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=20$ mm/s. Es ist deutlich sowohl im Schliff der Auftragschweißspur (Abb. 21) als auch in der Draufsicht auf die Auftragschweißspur (Abb. 22) zu sehen. Auf der Auftragschweißspur und an der Grenze der Auftragschweißspur im Schliff sind keine Anhaftungen zu erkennen. Es waren nur einige wenige Anhaftungen an der Grenze der Auftragschweißspur zum Substrat zu erkennen. Ansonsten ist bei dieser Auftragschweißspur keine Nachbearbeitung hinsichtlich der Glätte durchzuführen. Negativer Nebeneffekt ist ein sehr großer Wärmeeinflussbereich um die Auftragschweißspur herum. Dieser ist wiederum ungünstig für viele Anwendungen. In Abb. 21 sind größere und kleinere weiße Punkte innerhalb der Auftragschweißspur zu erkennen. Diese sind vermutlich Poren, deren Herkunft jedoch nicht sicher ist. Sie könnten sowohl bei der Spurerzeugung als auch beim Schleifen der Probe entstanden sein.

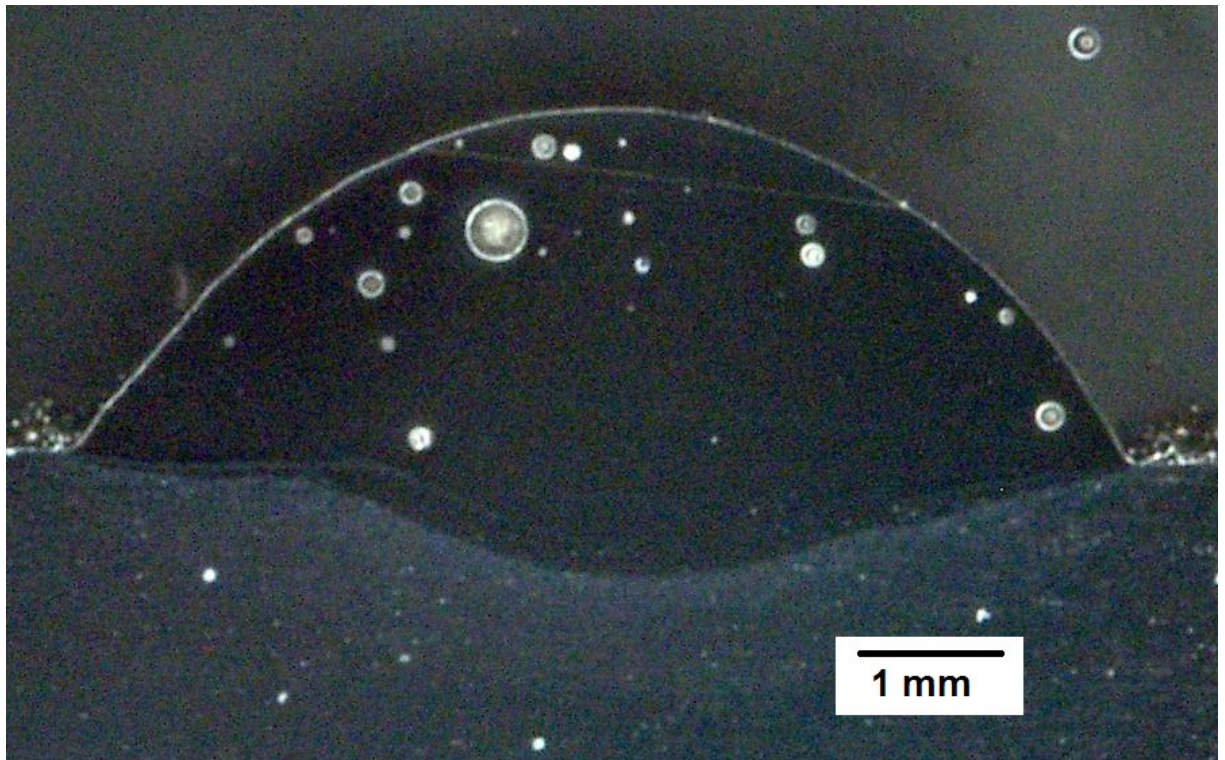


Abb. 21 Querschliff durch die Auftragschweißspur mit einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=20$ mm/s

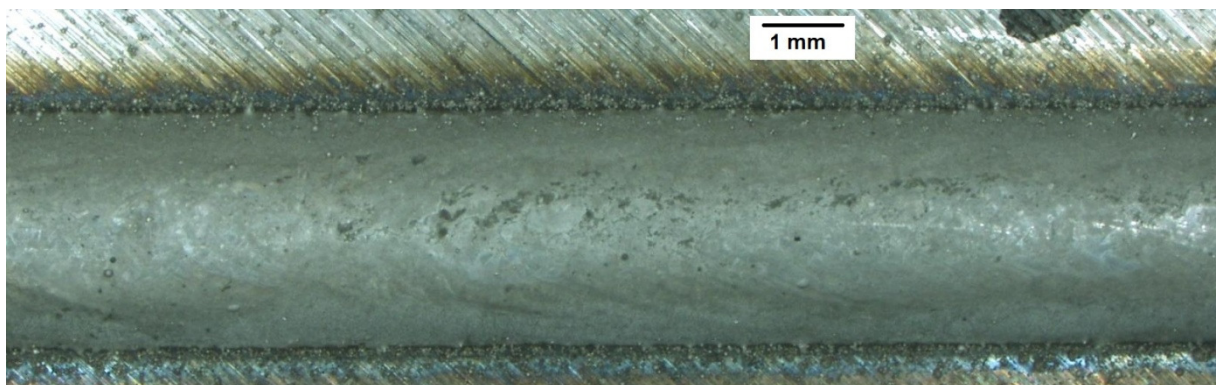


Abb. 22 Auftragschweißspur mit einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=20$ mm/s in der Draufsicht

Der Fördergasdurchfluss V_T :

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Pulvermassenstrom $\dot{m}=38,5$ g/min
- Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=45$ mm/s
- Durchfluss der Schutzgasummantelung $V_S=7,5$ l/min
- Laserleistung $P_L=2055$ W

Es wurden Auftragschweißspuren mit verschiedenen Fördergasdurchflüssen V_T erzeugt. Diese Versuchsreihe wurde ohne Gasdruckminimierung durchgeführt, da sich mit ihr keinerlei Einfluss zeigte. Es zeigte sich, wie bereits im Kapitel 5.1. beschrieben, eine starke Abhängigkeit des Pulvernutzungsgrades η vom Fördergasdurchfluss V_T (Abb. 23). Zu erkennen ist ein monotoner Abfall. Bereits bei $V_T=5$ l/min, die minimal benötigt werden um das gesamte Pulver, bei Verwendung von einem Pulverbehälter, zu fördern, zeigt sich ein Abfall von 30 % gegenüber dem Maximum bei $V_T=2$ l/min. Zurück zu führen ist es darauf, dass bei einem höheren Fördergasdurchfluss V_T die Pulverpartikel eine höhere Geschwindigkeit haben, wenn sie aus der Düse austreten. Damit verbringen sie weniger Zeit im Laserstrahl bevor sie auf der Substratoberfläche auftreffen und werden weniger erwärmt. Es ist zu vermuten, dass die Pulverpartikel damit noch sehr hart sind und durch ihre hohe Geschwindigkeit häufiger von der Substratoberfläche abprallen.

Der Verlauf kann jedoch nicht nur auf die Verringerung des Fördergasdurchflusses V_T zurückgeführt werden, dazu ist der Pulvernutzungsgrad η bei den ersten Messungen zu hoch. Es ist bei der Auswertung dieser Ergebnisse noch darauf zu achten das mit sinkendem Fördergasdurchfluss V_T der Einfluss der Schutzgasummantelung steigt. Somit wird bei geringerem Fördergasdurchfluss V_T der Divergenzwinkel des Pulverstrahls durch die Schutzgasummantelung stärker verringert als bei höherem Fördergasdurchfluss V_T . Das bedeutet, dass der Einfluss des Fördergasdurchflusses V_T und der des Durchflusses der Schutzgasummantelung V_S nur schwer unterscheidbar sind, solange keine Gasdruckminimierung verwendet wird. Darum kann der Einfluss auf die Partikelgeschwindigkeit nur sehr schwer eingeschätzt werden.

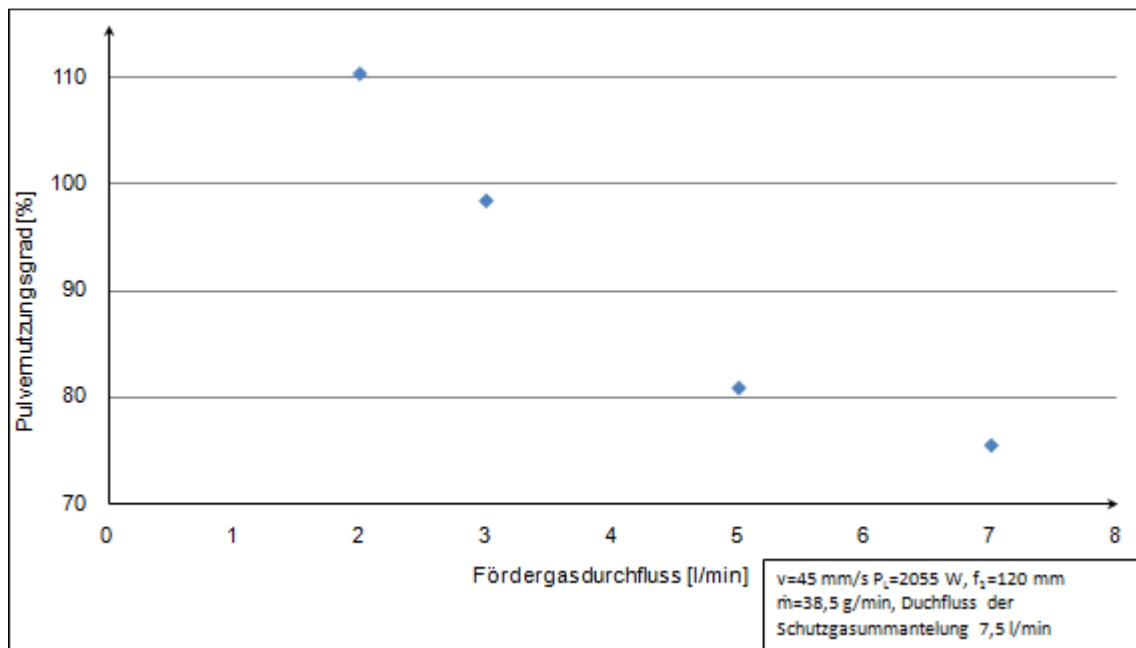


Abb. 23 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung des Fördergasdurchflusses V_T

In Abb. 24 sind zwei erzeugte Auftragschweißspuren zum Vergleich einmal mit (rechts) und einmal ohne (links) Gasdruckminimierung dargestellt. Es ist zu sehen, dass ohne Gasdruckminimierung die Zahl der, an der Oberfläche der Auftragschweißspur anhaftenden Pulverpartikel, deutlich höher ist. Dies lässt darauf schließen, dass die Pulverpartikel nur unzureichend aufgeschmolzen wurden. Damit Daraus ist zu schlussfolgern, dass weniger Energie in den Pulverpartikeln deponiert wurde und dafür mehr im Substratmaterial. Dies ist in Abb. 25 zu sehen. Bei der Auftragschweißspur ohne Gasdruckminimierung bildet sich eine deutlich tiefere Wurzel aus. Desweiteren nimmt die Spurhöhe h ab. Gerade die große Wurzeltiefe t ist damit eine Eigenschaft, die für eine gute Auftragschweißspur sehr ungünstig ist. Sie sollte im Vergleich zur Spurhöhe h nur etwa 0 bis 5 % betragen [4, Seite 54]. Durch die höhere Dichte des Pulverstrahls mit der Gasdruckminimierung wird die Wurzeltiefe t verringert, da mehr Laserstrahlung im Pulverstrahl absorbiert wird.

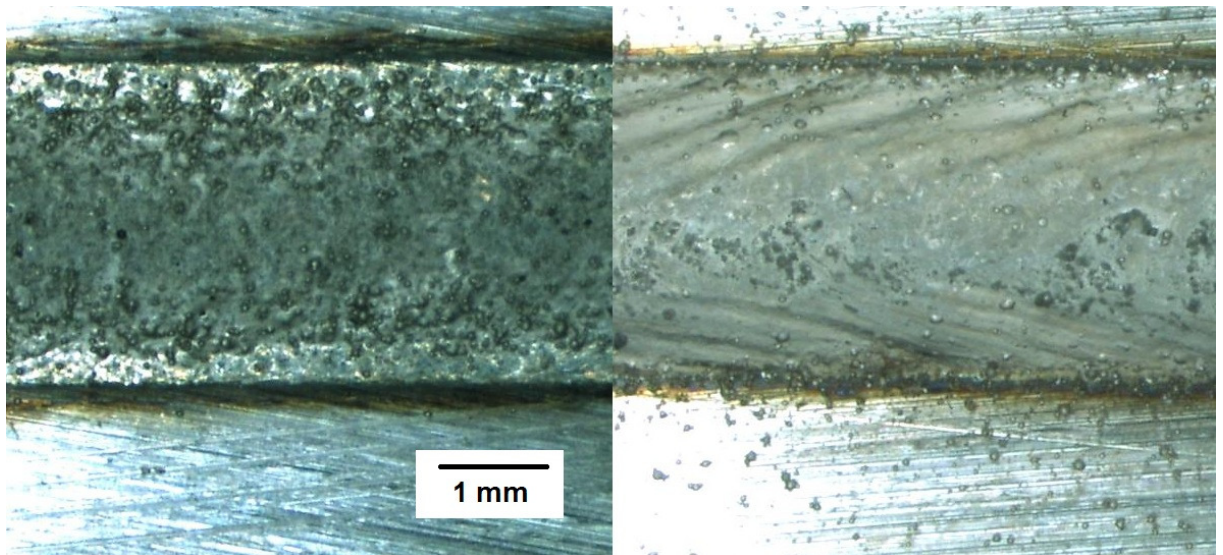


Abb. 24 Auftragschweißspur ohne (links) und mit (rechts) Gasdruckminimierung

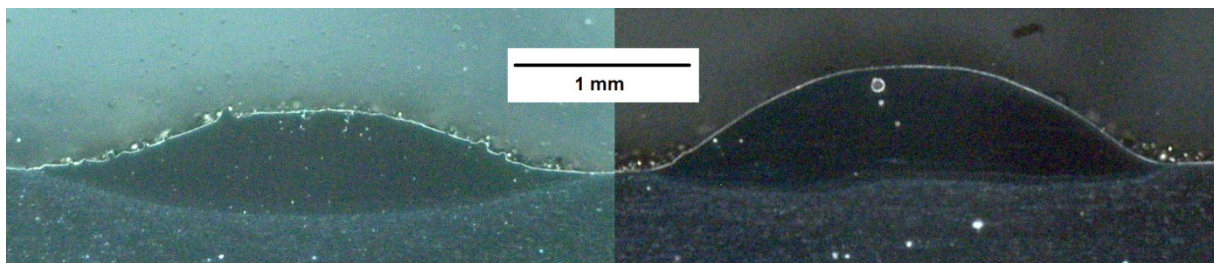


Abb. 25 Auftragschweißspur ohne (links) und mit (rechts) Gasdruckminimierung im Querschnitt

Der Durchfluss der Schutzgasummantelung \dot{V}_s :

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Pulvermassenstrom $\dot{m}=38,5 \text{ g/min}$
- Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=45 \text{ mm/s}$
- Laserleistung $P_L=2175 \text{ W}$
- Fördergasdurchfluss $\dot{V}_T=5 \text{ l/min}$

Zur Untersuchung des Einflusses des Durchflusses der Schutzgasummantelung \dot{V}_s wurden Auftragschweißspuren mit verschiedenen Durchflüssen der Schutzgasummantelung \dot{V}_s erzeugt. Der Schutzgasmantel drückt dabei den Pulverstrahl zusammen und verringert so die Pulverstrahldivergenz. Der

Düsenaustrittsdurchmesser wird dabei allerdings nicht unterschritten. Durch die Verwendung der Gasdruckminimierung bekommt die Schutzgasummantelung noch eine weitere Funktion. Das eigentliche Schutzgas beim Laserpulverauftragschweißen ist üblicherweise das Fördergas, das das Pulver transportiert. Da das Fördergas nahezu vollständig durch die Gasdruckminimierung entfernt wurde, ist die Bearbeitungsstelle nicht mehr vor Oxidation geschützt. Die Schutzgasummantelung dient damit zusätzlich zum Schutz vor Oxidation. Bei zu geringer oder keiner Schutzgasummantelung kommt es ansonsten zur Oxidation der Auftragschweißspur und des sie umgebenden Substrates (Abb. 26).

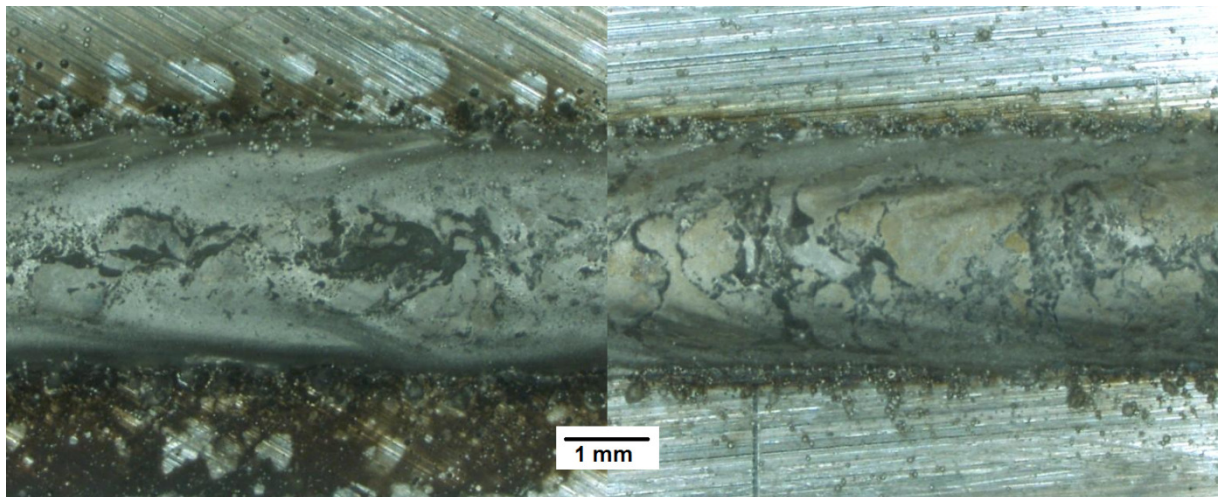


Abb. 26 Auftragschweißspur bei Verwendung der Gasdruckminimierung ohne (links) und mit (rechts) Schutzgasummantelung

Die Wirkung auf den Pulvernutzungsgrad η ist nur minimal. Abb. 27 zeigt den Pulvernutzungsgrad η bei verschiedenen Durchflüssen der Schutzgasummantelung V_S . Es zeigt sich ein Maximum bei 5 l/min und von da aus ein beidseitiger Abfall. Dieser ist jedoch im untersuchten Parameterbereich nur sehr gering (ca. 7 %).

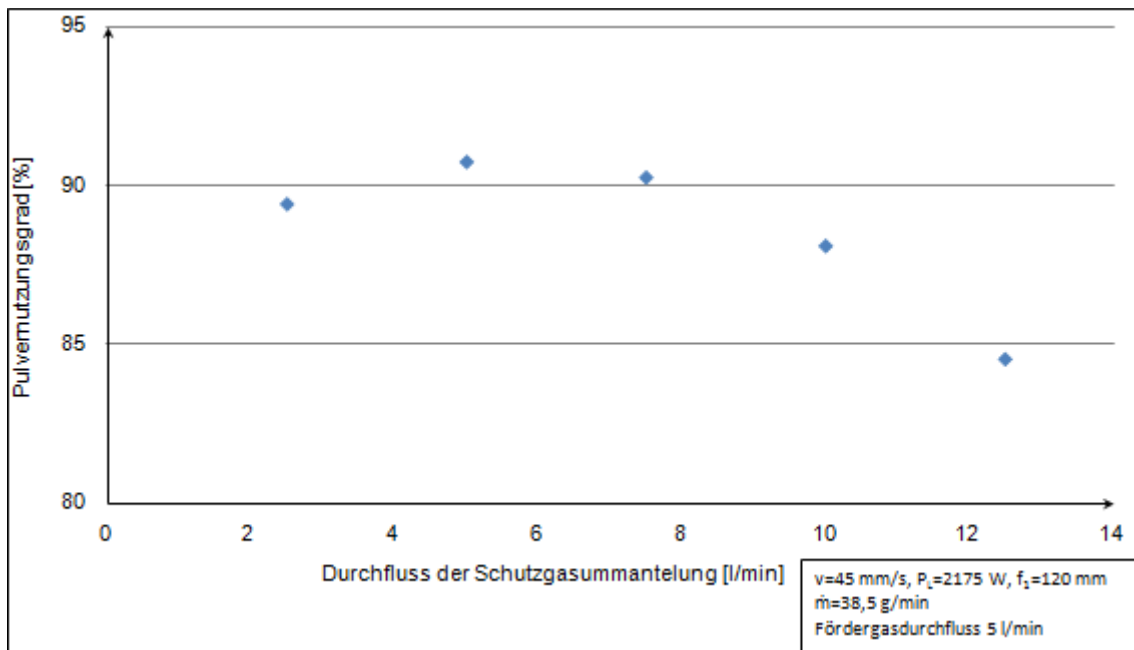


Abb. 27 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung des Durchflusses der Schutzgasummantelung V_s

Der Pulvermassenstrom \dot{m} :

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Laserleistung $P_L=2175 \text{ W}$
- Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=45 \text{ mm/s}$
- Durchfluss der Schutzgasummantelung $V_s=7,5 \text{ l/min}$
- Fördergasdurchfluss $V_T=5 \text{ l/min}$

Zur Untersuchung der Pulvermassenstrom \dot{m} wurden Auftragschweißspuren mit einem schrittweise erhöhtem Pulvermassenstrom \dot{m} erzeugt. Bei den erzeugten Auftragschweißspuren blieb der Pulvernutzungsgrad η trotz einer Erhöhung des Pulvermassenstroms \dot{m} nahezu konstant (Abb. 28). Die maximale Differenz zwischen den Werten betrug lediglich 5 %. Es zeigte sich im untersuchten Parameterbereich keine Tendenz.

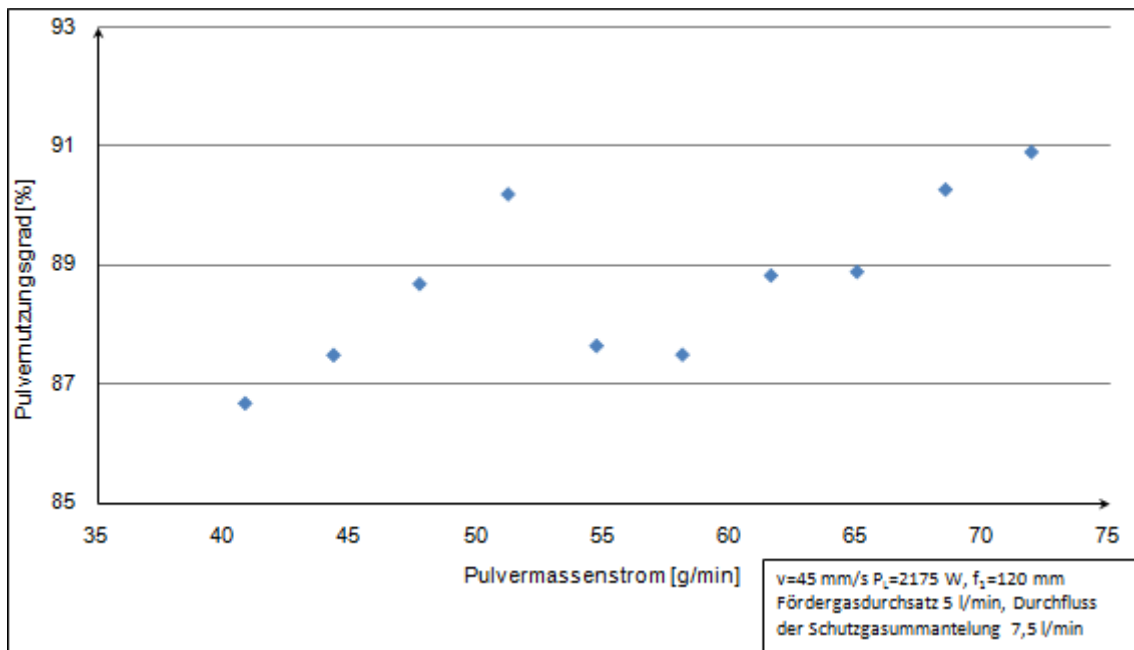


Abb. 28 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung des Pulvermassenstroms \dot{m}

Jedoch verschlechterte sich die Qualität der Auftragschweißspur dahingehend, dass es zu Unterbrechungen innerhalb der Auftragschweißspur kam und bei den höchsten Förderraten keinerlei Anbindung der Auftragschweißspur an das Substrat erfolgte. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass der Pulverstrahl bereits kurz nach dem Austreten aus der Pulverdüse und dem Eintritt in den Laserstrahl zu einem Großteil aufgeschmolzen wurde. Es bildeten sich während des Fluges zum Substrat immer größer werdende Schmelzperlen die dann mit ihrer hohen thermischen Energie auf das Substrat auftreffen. Bei einer sehr hohen Pulvermassenstrom \dot{m} wird dadurch nahezu die gesamte Laserleistung P_L im Pulverstrahl absorbiert und es kommt nur zu einer geringen Erwärmung des Substrates direkt durch den Laserstrahl. Da die erzeugten Auftragschweißspuren trotzdem noch eine Anbindung an das Substrat besaßen, musste die fehlende Energie zum Aufschmelzen des Substrates aus den Schmelzperlen des Pulvers kommen. Erst wenn so viel Pulver durch den Laserstrahl aufgeschmolzen wurde, dass die Temperatur der Schmelzperlen nicht mehr hoch genug ist, d.h. dass die thermische Energie der Schmelzperlen nicht mehr ausreicht um beim Auftreffen auf das Substrat dieses aufzuschmelzen, erst dann wird die erzeugte Auftragschweißspur keine Anbindung mehr an das Substrat haben. Abb. 29 zeigt einen Schliff längs durch einen Teil einer Auftragschweißspur mit einer sehr hohen Pulvermassenstrom \dot{m} . Die rot markierten Bereiche zeigen dabei die Stellen

an denen die Auftragschweißspur keinerlei Anbindung an das Substrat hat. Trotz des doch sehr großen Bereiches der Auftragschweißspur der keine Anbindung an das Substrat hat, lies sich diese Auftragschweißspur nicht vom Substrat lösen.

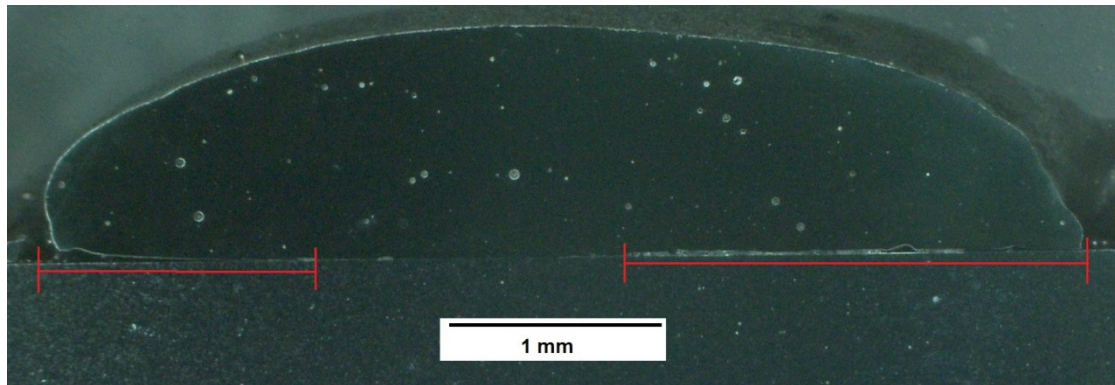


Abb. 29 Längsschliff einer Auftragschweißspur mit teilweise fehlender Anbindung an das Substrat

5.2.2. Maximierung des Pulvernutzungsgrades η

Nachdem in den vorherigen Versuchsreihen der Einfluss der einzelnen Parameter untersucht wurde, sollte nun anhand deren Ergebnisse Auftragschweißspuren mit maximalem Pulvernutzungsgrad η erzeugt werden. Diese sollten zudem eine gute Anbindung an das Substrat, aber eine möglichst geringe Wurzeltiefe t haben. Auch sollten sie in ihrem Verlauf eine gleichmäßige Höhe aufweisen. Abb. 30 zeigt den Querschliff einer solchen Auftragschweißspur. Sie wurde bei einer Laserleistung von $P_L=2055$ W, einem Pulvermassenstrom von $\dot{m}=23,2$ g/min, einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=50$ mm/s, einem Fördergasdurchfluss von $\dot{V}_T=5$ l/min und einem Durchfluss der Schutzgasummantelung $\dot{V}_S=7,5$ l/min erzeugt. Es ist zu sehen, dass es nur einen geringen Aufmischungsbereich zwischen der Auftragschweißspur und dem Substrat gibt. Um das zu erreichen wurde die Laserleistung P_L so gewählt, dass nur wenig Energie des Laserstrahls im Substrat deponiert wurde und damit nur eine dünne Schicht an der Oberfläche des Substrates aufgeschmolzen wurde. Bei den Versuchen wurden Auftragschweißspuren mit Pulvernutzungsgraden η zwischen 90 und 100 % erzeugt. Eine Variation der Spurhöhe h ist hierbei durch eine Anpassung der Laserleistung P_L ,

Pulvermassenstrom \dot{m} und der Bearbeitungsgeschwindigkeit v möglich. Somit führt eine geringere Bearbeitungsgeschwindigkeit v bei gleichbleibendem Pulvermassenstrom \dot{m} zu einer höheren Auftragschweißspur aber auch zu einer größeren Wurzeltiefe t . Diese kann durch ein Absenken der Laserleistung P_L wieder reduziert werden. Wird hingegen die Pulvermassenstrom \dot{m} bei gleichbleibender Bearbeitungsgeschwindigkeit v erhöht, so nehmen die Wurzeltiefe t und damit die Anbindung der Auftragschweißspur an das Substrat ab. Um diese wieder zu erhöhen muss die Laserleistung P_L erhöht werden. Mit diesen Ergebnissen ist es möglich Auftragschweißspuren guter Qualität mit einem hohen Pulvernutzungsgrad η und variabler Spurhöhe h zu erzeugen.

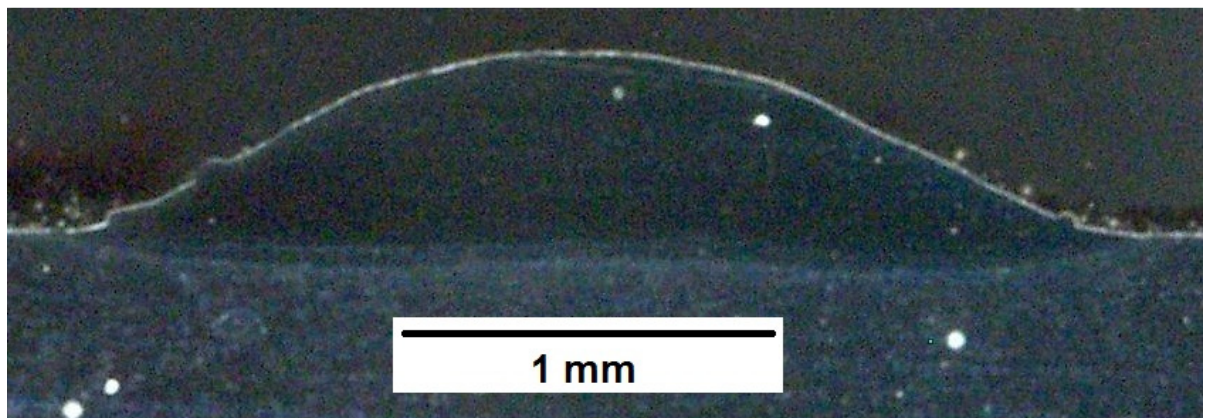


Abb. 30 Querschliff einer Auftragschweißspur bei nahezu 100 % Pulvernutzungsgrad η

5.3. Pulversättigungsgrad

Der Begriff des Pulversättigungsgrades beschreibt in dieser Arbeit den maximal mit einer bestimmten Laserleistung P_L umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} . Ist der Pulversättigungsgrad erreicht wird laut dieser Definition nahezu die gesamte Laserleistung P_L zur Aufschmelzung des Pulvers verwendet und es entsteht nur eine minimale Wurzeltiefe t . Nur ein sehr geringer Teil der Laserleistung P_L wird zur Aufschmelzung der Substratoberfläche verwendet. Damit stellt der Pulversättigungsgrad eine Erweiterung des Pulvernutzungsgrades η dar. Denn es ist das Ziel die maximale Pulverumsatzmenge zu bestimmen die bei einer gewählten Laserleistung P_L erreicht werden kann, bei gleichzeitig hohem Pulvernutzungsgrad η und unter Berücksichtigung einer hohen Spurqualität.

Ersten Annahmen zufolge würde bei einer Überschreitung des Pulversättigungsgrades der Pulvernutzungsgrad η absinken [4, Seite 56]. Dies stellte bestätigte sich im Verlauf der Versuchsreihe jedoch nicht. Der Pulvernutzungsgrad η lag bei allen Versuchen zwischen 90 und 100 %. Somit wurde zur Bestimmung des Pulversättigungsgrades bzw. der Punkt des Umschlagens in eine Übersättigung durch die Spurqualität festgelegt. Eine übersättigte Auftragschweißspur hat demzufolge eine nicht konstante Spurhöhe h bis hin zu Unterbrechungen im Spurverlauf. Diese Eigenschaften würden eine Auftragschweißspur in den meisten Fällen für weitere Verwendungszwecke ungeeignet machen.

Auf Grundlage der Vorversuche wurden 2 Parameter zur Untersuchung des Pulversättigungsgrades untersucht: die Laserleistung P_L und die Bearbeitungsgeschwindigkeit v . Beide nehmen einen direkten Einfluss auf den Pulversättigungsgrad und sorgen zudem durch ihre Variation für eine Variation der entstehenden Spurhöhe h . Damit bieten sie die Möglichkeit einer optimalen Steuerung für diese Spureigenschaft.

Bei den Versuchen wurden 2 Optiken mit einer Brennweite von $f_1=120$ mm und $f_2=200$ mm verwendet. Diese erzeugten auf der Bearbeitungsstelle sehr unterschiedliche Fokusbereiche. Um trotz allem den gesamten Laserstrahl auszunutzen wurde für die Versuche mit der Optik mit $f_2=200$ mm Brennweite der Abstand der Pulverdüse vom Bearbeitungsort so erhöht, dass der Pulverfleck auf der Bearbeitungsstelle etwa im Bereich des Laserstrahlfokus lag. Durch die nahezu

Top-Head-Verteilung des Laserstrahls können damit Auftragschweißspuren unterschiedlicher Spurbreite b erzeugt werden. Optimal haben diese etwa den Fokusbereich d .

Mit beiden Optiken wurden je einer Versuchsreihe zur Untersuchung der Laserleistung P_L und je eine zur Untersuchung der Bearbeitungsgeschwindigkeit v durchgeführt. In den folgenden Kapiteln werden diese näher erläutert.

5.3.1. Einfluss der Laserleistung P_L

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Durchfluss der Schutzgasummantelung $V_S=5$ l/min
- Fördergasdurchfluss $V_T=10$ l/min
- Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=45$ mm/s

Bei der Untersuchung der Laserleistung P_L wurden Auftragschweißspuren mit einer schrittweise steigenden Laserleistung P_L , die wiederum über den Diodenstrom geregelt wurde, bzw. einem schrittweise steigenden Pulvermassenstrom \dot{m} erzeugt. Begonnen wurde dabei bei einem Diodenstrom von 80 A, was einer Laserleistung $P_L=1328$ W entspricht. Nun wurde der Pulvermassenstrom \dot{m} schrittweise über die Tellerdrehzahl der beiden Förderscheiben erhöht bis die erzeugte Auftragschweißspur eindeutig übersättigt war. War dies eingetreten wurde die Laserleistung P_L erhöht bis die erzeugte Auftragschweißspur nicht mehr übersättigt war. Dann wurde wieder der Pulvermassenstrom \dot{m} erhöht bis entweder die Laserleistung P_L oder der Pulvermassenstrom \dot{m} ihr Maximum erreicht hatten. Dabei wurde der Diodenstrom in Schritten von 10 A erhöht und die Drehzahl der Förderscheiben pro Pulverbehälter in 0,5 Umdrehungen pro Minute Schritten, also insgesamt um 1 Umdrehung pro Minute.

Die Abb. 31 und Abb. 32 zeigen die Kurven auf, die die im Versuch erzeugten Auftragschweißspuren nach übersättigte und noch nicht gesättigte Auftragschweißspuren unterteilen (blau). Der Kurvenverlauf wird dabei durch die Parameterpaare gekennzeichnet bei denen eine Auftragschweißspur entstanden ist die in ihrer Qualität gerade noch verwendbar war. Als Kriterium galt dabei vor allem

die Konstanz der Spurhöhe h , da diese bei übersättigten Auftragschweißspuren sehr stark schwanken konnte, bis hin zu Unterbrechungen im Spurverlauf. Dabei stellt der Bereich oberhalb der Kurve den Bereich der Übersättigung und der Bereich unter der Kurve den Bereich der Untersättigung dar. Die Kurve zeigt einen exponentiellen Verlauf, der seinen Anfangspunkt bei der minimalen Laserleistung P_L hat, bei der noch eine Auftragschweißspur erzeugt werden konnte. Sie endet bei der maximal einstellbaren Laserleistung P_L . Als weitere Grenze nach oben hin wäre der maximale Pulvermassenstrom \dot{m} des Pulverförderers möglich gewesen. Dieser wurde jedoch mit der maximalen Laserleistung P_L nicht erreicht.

Zusätzlich wird die erreichte Spurhöhe h der Auftragschweißspuren für maximale Sättigung mit dargestellt (rot). Auch diese zeigt einen exponentiellen Verlauf. Die maximale Spurhöhe lag dabei bei ca. $h=1,7$ mm.

Da der maximal verarbeitbare Pulvermassenstrom \dot{m} , vor allem bei der Verwendung der Optik mit der Brennweite $f=200$ mm, noch weit unterhalb des maximalen Pulvermassenstroms \dot{m} liegt, wäre es in Erwägung zu ziehen ein Lasersystem höherer Laserleistung P_L zu verwenden, um den Pulverförderer auch bis zum Maximum ausnutzen zu können. Besonders geeignet wäre dies für breitere Auftragschweißspuren, die mit der Optik mit der Brennweite $f=200$ mm erzeugt werden könnten.

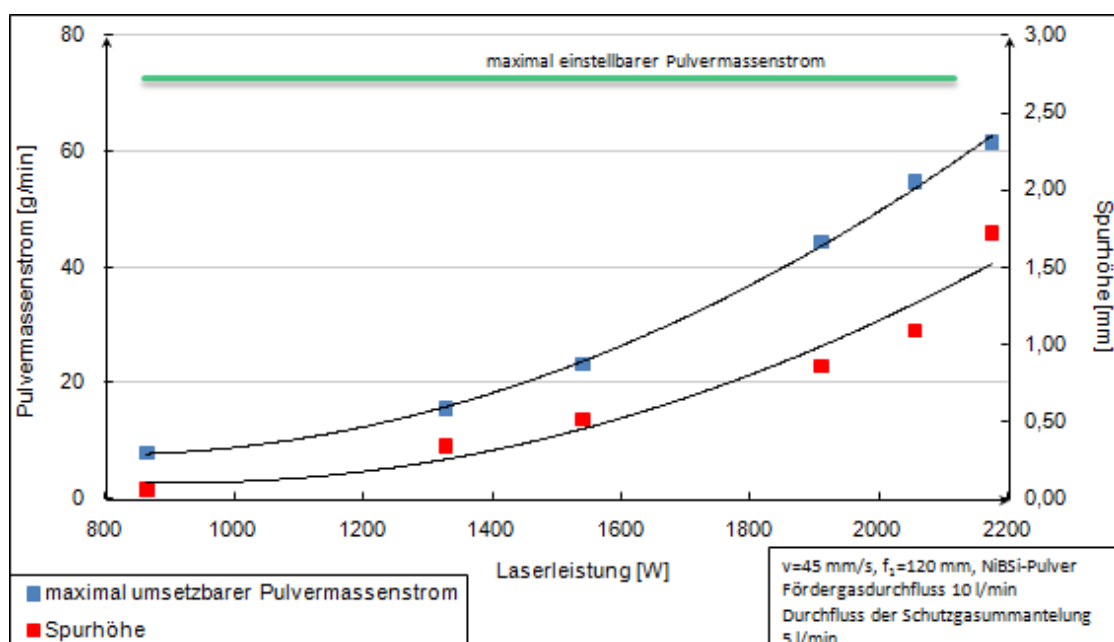


Abb. 31 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Laserleistungen P_L mit $f_1=120$ mm

In Abb. 31 wurde im Vergleich zur Abb. 32 eine höhere Brennweite ($f_2=200$ mm) verwendet. Zudem wurde der Pulverdüsenabstand erhöht um den Pulverfokus auf der bearbeitungsstelle dem größeren Laserstrahlfokus anzupassen. Wie zu erwarten war konnte hier erst mit einer wesentlich höheren Laserleistung P_L die ersten Auftragschweißspuren erzeugt werden. Durch die geringere Intensität, die aus der höheren Brennweite f und dem damit verbundenen größeren Fokusbereich d resultiert, war es bei kleineren Laserleistungen P_L nicht möglich die Pulverpartikel aufzuschmelzen, wodurch keine Auftragschweißspur entstand. Auch wenn es zu vermuten sein könnte, dass durch die größere Breite der entstehenden Auftragschweißspuren ähnlich viel Pulver mit der maximalen Laserleistung P_L verarbeitet werden kann, so ist dies jedoch nicht eingetreten. Durch die geringere Intensität werden die Pulverpartikel im Laserstrahl nicht so stark erwärmt. Auch wenn durch den größeren Laserstrahldurchmesser die Pulverpartikel länger innerhalb des Laserstrahls verweilen so wird trotzdem weniger Laserstrahlung von einem einzelnen Pulverpartikel absorbiert. Es wird eine wesentlich höhere Laserleistung P_L benötigt um genauso viel Pulver umzusetzen wie bei der geringeren Brennweite ($f=120$ mm). Ein weiterer Faktor der nicht außer Acht zu lassen ist, ist die Wurzeltiefe t . Durch die Erhöhung des Düsenabstandes zur Bearbeitungsstelle und der damit erreichten Vergrößerung des Pulverstrahlfokus ist die Dichte des Pulverstrahls im Laserstrahl gesunken. Damit dringt mehr Laserstrahlung bis zum Substrat vor und erwärmt dieses. Die Folge war, dass die Wurzeltiefe t zunimmt. Durch die größere Spurbreite b und der geringere umgesetzte Pulvermassenstrom \dot{m} ist auch die Spurbreite h entsprechend geringer. Es konnten bei maximaler Laserleistung P_L nur Auftragschweißspuren mit einer Spurbreite von ca. $h=300$ μm erzeugt werden. Allerdings stellte sich heraus, dass die verwendete Bearbeitungsgeschwindigkeit für einen Vergleich ungünstig gewählt war. Sie hätte geringer sein sollen.

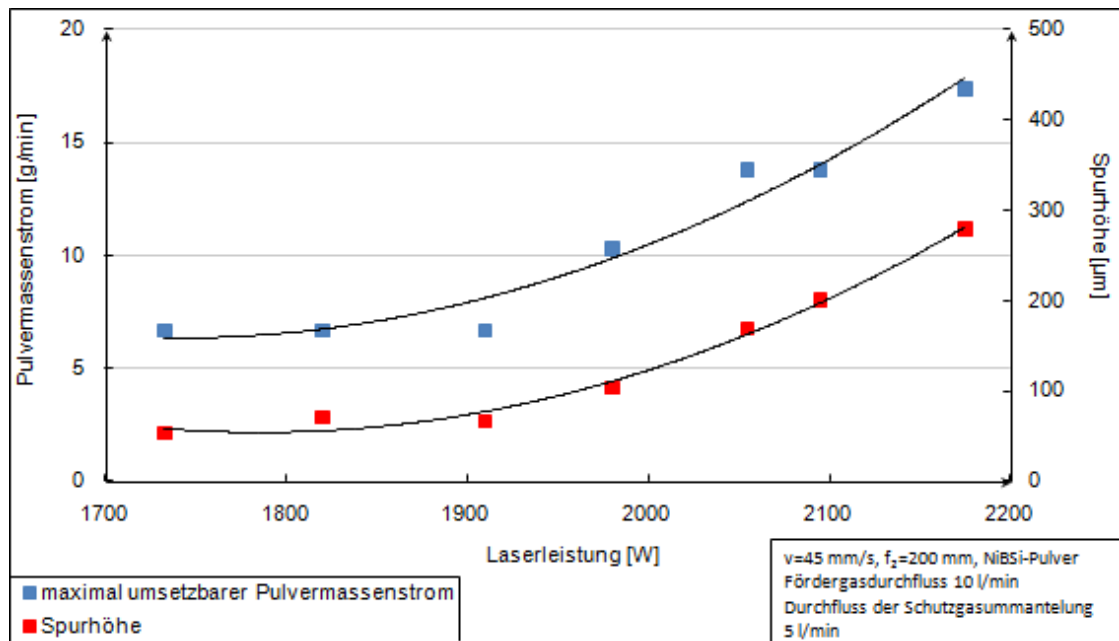


Abb. 32 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurbhöhe h bei unterschiedlichen Laserleistungen P_L mit $f_2=200 \text{ mm}$

Bei den Auftragschweißspuren die mit der Brennweite $f_2=200 \text{ mm}$ erzeugt wurden, wurde bei geringen Leistungen nicht in der gesamten Fokusbreite Pulver angebunden (Abb. 33). Erst bei der maximalen Laserleistung P_L wurde im gesamten Fokusbereich Pulver an das Substrat angebunden (Abb. 34). Folglich hat die Spurbreite b geringfügig zugenommen und die Wärmeeinflusszone um die Auftragschweißspur herum hat sich verringert. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Pulvermassenstrom \dot{m} die Wurzeltiefe t abnimmt, obwohl sie durch die Zunahme der Laserleistung P_L größer werden sollte.



Abb. 33 Querschliff einer Auftragschweißspur die mit $f_2=200 \text{ mm}$ bei geringer Laserleistung P_L und geringem Pulvermassenstrom \dot{m} aufgetragen wurde

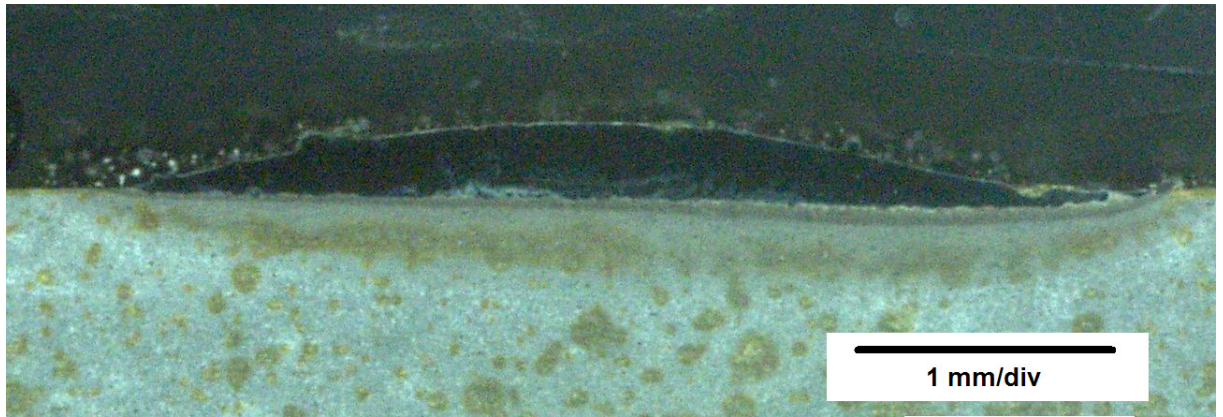


Abb. 34 Querschliff einer Auftragschweißspur die mit $f_2=200$ mm bei hoher Laserleistung P_L und hohem Pulvermassenstrom \dot{m} aufgetragen wurde

Der dunkle Bereich zeigt das eingebrachte Pulver. Der wird von einem helleren Bereich umgeben. Dabei handelt es sich um den Aufmischungs- bzw. Wärmeeinflussbereich.

5.3.2. Einfluss der Bearbeitungsgeschwindigkeit v

Bei den Versuchen blieben folgende Parameter unverändert:

- Durchfluss der Schutzgasummantelung $V_S=5$ l/min
- Fördergasdurchfluss $V_T=10$ l/min
- Laserleistung $P_L=2175$ W

Bei der Untersuchung der Bearbeitungsgeschwindigkeit v wurden Auftragschweißspuren mit einer schrittweise steigenden Bearbeitungsgeschwindigkeit v und einem darauf angepassten Pulvermassenstrom \dot{m} erzeugt. Dabei wurde wie in Kapitel 5.3.1. beschrieben vorgegangen. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit v wurde in Schritten von 10 mm/s angefangen bei 25 mm/s bis zu einem Maximum von 95 mm/s erhöht.

In Abb. 35 und Abb. 36 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt. Deutlich ist zu sehen, dass das Maximum sowohl der Spurhöhe h (rot) als auch des verarbeiteten Pulvermassenstroms \dot{m} (blau) bei der geringsten Bearbeitungsgeschwindigkeit v liegt. Die maximale erzeugte Spurhöhe beträgt hierbei ca. $h=2$ mm und der maximal

umgesetzte Pulvermassenstrom ca. $\dot{m}=70$ g/min. Zu höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten v hin zeigen beide Kurven ein monoton fallendes Verhalten, über das jedoch durch die geringe Anzahl der Messwerte keine genaueren Aussagen getroffen werden konnte. Es ist anzunehmen, dass der Verlauf wie bei dem Einfluss der Laserleistung P_L exponentiell ist. Die mit der maximalen Bearbeitungsgeschwindigkeit v erzeugten Auftragschweißspuren haben dabei eine sehr geringe Spurhöhe (ca. $h=300$ μm) bzw. im Falle der Versuche mit der Optik mit der Brennweite $f=200$ mm konnten keine Auftragschweißspuren mehr erzeugt werden. Wie bereits im Kapitel 5.3.1. beschrieben stellt der Bereich oberhalb der Kurve den Bereich der Übersättigung dar, während der Bereich unter der Kurve den Bereich der Untersättigung darstellt.

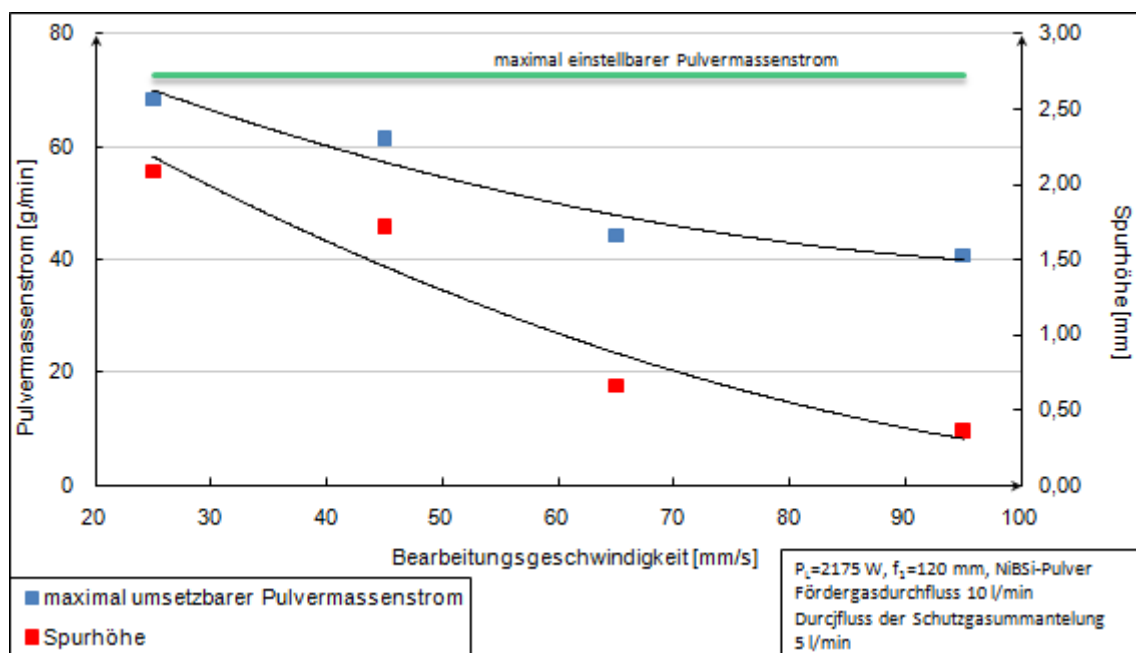


Abb. 35 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit $f_1=120$ mm

In Abb. 36, die den Verlauf der erzeugten Auftragschweißspuren mit der Optik der Brennweite $f=200$ mm darstellt, zeigen sich deutliche Abweichungen zu Abb. 35, hinsichtlich des maximal umsetzbaren Pulvermassenstromes \dot{m} und der erzeugten Spurhöhe h . So konnte bei gleichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten v mit der größeren Brennweite nur etwa die Hälfte der Pulvermenge umgesetzt werden.

Zudem konnte ab einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=75$ mm/s keine Auftragschweißspur mehr erzeugt werden. Die maximal erzeugte Spurhöhe h liegt bei ca. 900 μm und die maximal verwendete Bearbeitungsgeschwindigkeit bei $v=65$ mm/s. Der maximal umgesetzte Pulvermassenstrom liegt bei ca. $\dot{m}=35$ g/min. Folglich kann auch hier gesagt werden, dass das Lasersystem für die Optik mit einer Brennweite $f=200$ mm eine zu geringe maximale Laserleistung P_L bereitstellt. Somit ist es in Erwägung zu ziehen ein Lasersystem mit mehr Laserleistung P_L in die Anlage zu integrieren.

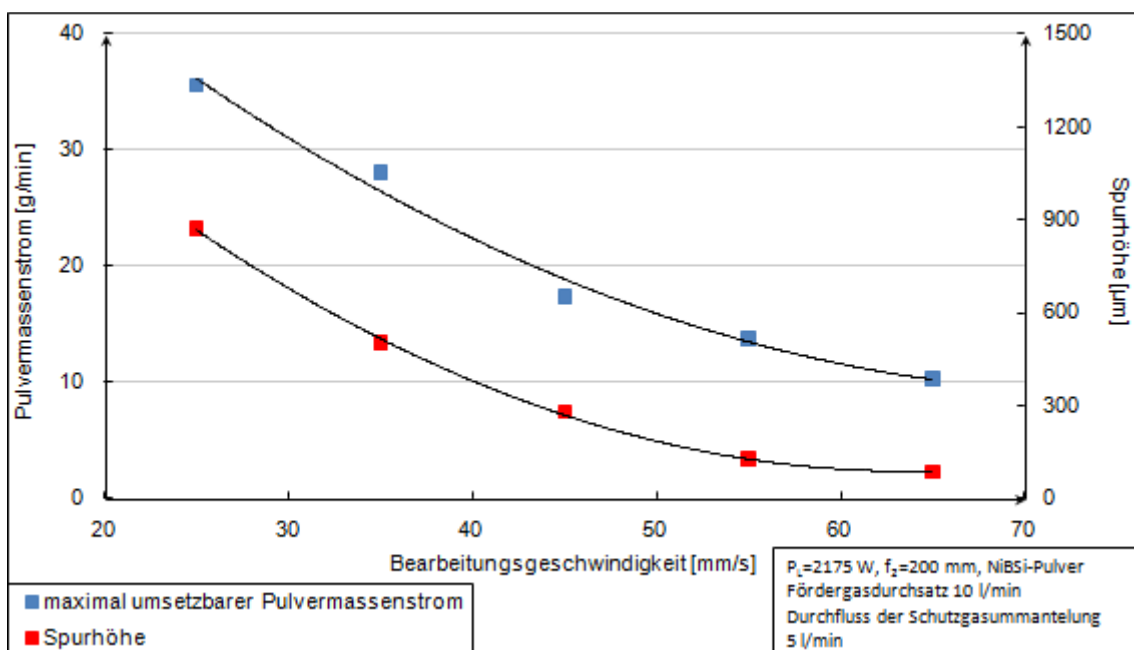


Abb. 36 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit $f_2=200$ mm

6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die Grenzen der in Kapitel 4 beschriebenen Laseranlage zum Laserpulverauftragschweißen zu ergründen und für weitere Arbeiten mit dieser Anlage Parametersätze zu finden mit denen die Anlage optimal genutzt werden kann. Dabei sollte vor allem die Effizienz des Verfahrens so hoch wie möglich sein. Dazu stand eine Pulverdüse mit einer Schutzgasummantelung zur Verfügung. Um dies zu erreichen wurde zuerst die Form des Pulverstrahls untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die Menge des zum Transport des Pulvers vom Pulverförderer zur Bearbeitungsstelle benötigten Fördergases einen negativen Einfluss auf die Pulverstrahlform hat. Als Konsequenz wurde eine Vorrichtung konstruiert mit deren Hilfe die Menge des Fördergases kurz vor der Düse drastisch reduziert wurde. Dadurch war es nun möglich den Pulverstrahl sehr gut zu Fokussieren und dessen Divergenz stark zu verringern.

Mit Hilfe der neu entwickelten Gasdruckminimierung wurden Versuche zum Pulvernutzungsgrad η durchgeführt bei denen dieser maximiert werden sollte. Dazu wurden verschiedenen Parameter untersucht. Sowohl die Laserleistung P_L als auch der Durchfluss der Schutzgasummantelung V_s zeigten dabei einen starken Einfluss auf den Pulvernutzungsgrad η . Zum Teil problematisch stellt sich dabei aber die Bestimmung des Pulvernutzungsgrades η selbst dar. Vor allem bei der Messung des Pulvermassenstromes \dot{m} kam es zu Schwankungen deren Ursache nicht geklärt werden konnten. An dieser Stelle sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Mit Hilfe der nun optimierten Parameter für den Pulvernutzungsgrad η wurden Versuche zum maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} durchgeführt. Hier war das Ziel die Effizienz des Verfahrens so weit wie möglich zu erhöhen. Zudem sollte im Anschluss eine Abschätzung der zu erwartenden Spurhöhe möglich sein. Dabei wurde der Einfluss der Laserleistung P_L und der Bearbeitungsgeschwindigkeit v untersucht, da durch diese die Spurhöhe h einer Auftragschweißspur maßgeblich bestimmt wird. Zudem wurden 2 verschiedene Brennweiten mit $f_1=120$ mm und $f_2=200$ mm verwendet. Dabei stellte sich heraus, dass mit steigender Leistung und sinkender Bearbeitungsgeschwindigkeit v der maximal umsetzbare Pulvermassenstrom \dot{m} und die Spurhöhe h zunehmen. Außerdem wurde festgestellt

das bei den Versuchen mit der Brennweite $f_2=200$ mm dieses Maximum deutlich geringer war. Der maximal umsetzbare Pulvermassenstrom \dot{m} betrug ca. die Hälfte und die maximale Spurhöhe h auch. Allerdings waren die Auftragschweißspuren dafür ca. 50 % breiter. Somit wurden Parametersätze gefunden mit denen Auftragschweißspuren mit einem Pulvernutzungsgrad von über $\eta=90$ %, einer maximalen Ausbeute der Laserleistung P_L und einer geringen Wurzeltiefe t erzeugt werden können.

Weitere Untersuchungen könnten entsprechende Parametersätze z.B. der Laserleistung P_L für weitere Bearbeitungsgeschwindigkeiten v zum Ziel haben, da Versuche zur Laserleistung P_L in dieser Arbeit nur mit einer festen Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=45$ mm/s erstellt wurden. Weiterhin könnten Parametersätze für die Bearbeitungsgeschwindigkeit v untersucht werden, da Versuche zur Bearbeitungsgeschwindigkeit v in dieser Arbeit nur mit einer konstanten Laserleistung $P_L=2175$ W untersucht wurden.

Anhang Versuchsaufbau

Ausrichtung der Pulverdüse zur Verfahrrichtung: schleppend
 Winkel zwischen Pulverstrahl- und Laserstrahlachse (α): 30°
 Position Pulverstrahldurchmesser (d_P) – Laserstrahldurchmesser (d_L): mittig

Brennweite der verwendeten Optik	$f=120\text{ mm}$	$f=200\text{ mm}$
Abstand Pulverdüse zum Substrat (a)	10 mm	18 mm
Abstand Optik zum Substrat (h)	101,5 mm	176 mm
Pulverstrahldurchmesser (d_P)	ca. 2 mm	ca. 4 mm

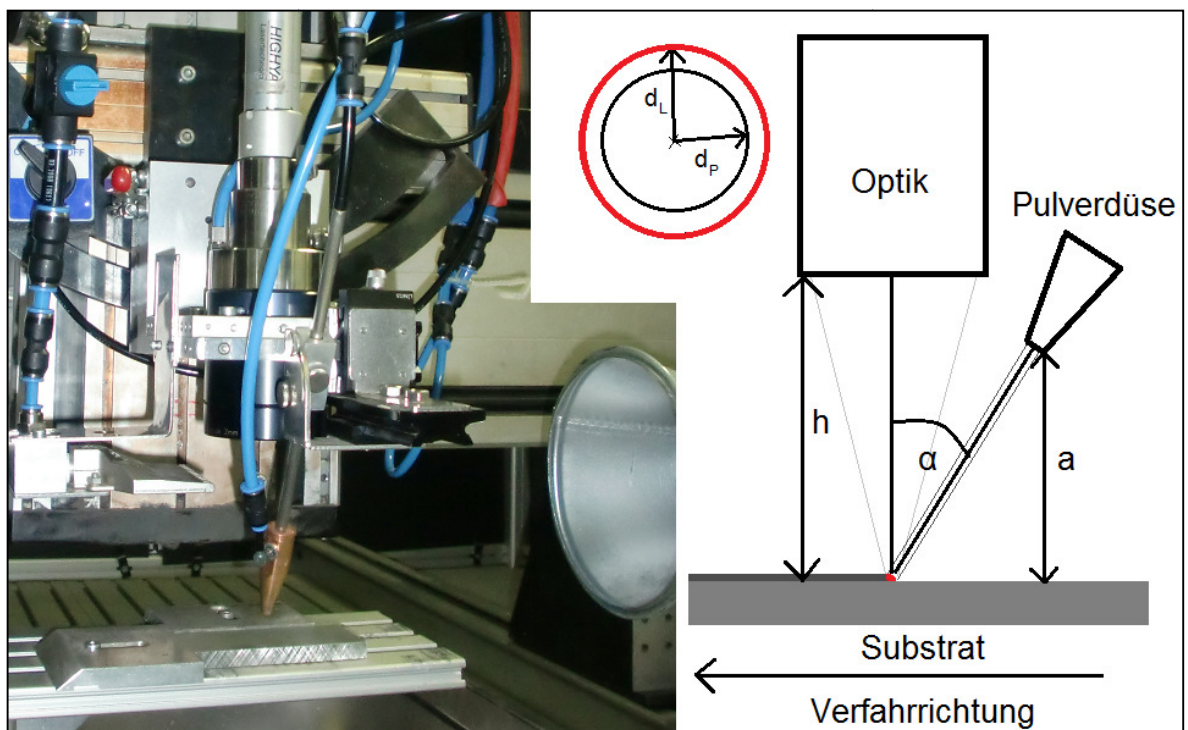


Abb. 37 Versuchsaufbau

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
P_L	Laserleistung
\dot{m}	Pulvermassenstrom
V_T	Fördergas-/Transportgasdurchfluss
f_1	Brennweite der ersten Optik 120 mm
f_2	Brennweite der zweiten Optik 200 mm
λ_1	Erste Wellenlänge der Diodenstacks von 808 nm
λ_2	Zweite Wellenlänge der Diodenstacks von 940 nm
d_1	Fokusbereich bei $f_1=120$ mm
d_2	Fokusbereich bei $f_2=200$ mm
I_G	Diodenstrom
V_S	Durchfluss der Schutzgasummantelung
v	Bearbeitungsgeschwindigkeit
l	Spurlänge
t	Wurzeltiefe
b	Spurbreite
h	Spurhöhe
d	Fokusbereich des Laserstrahls
η	Pulvernutzungsgrad

Literaturverzeichnis

- [1] Shen, Jialin: Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung bei gleichzeitiger Pulverzufuhr Hg. v. B. G. Teubner Stuttgart, Stuttgart 1994
- [2] Marquering, Manfred: Beitrag zum Laserstrahl-Pulver-Auftragschweißen von Aluminiummehrstoffbronze Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 467 Hg. v. VDI Verlag, Düsseldorf 1997
- [3] Angebot des Fraunhofer Instituts für Werkzeug- und Strahltechnik Dresden
- [4] Walter, Jens: Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und –regelung Hg. v. Herbert Utz Verlag, Stuttgart 2007

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Prinzipskizzen der 3 Pulverfördersysteme, von links nach rechts: der Twin-10-C der Firma Plasma-Technik AG; der MFP der Firma Metco; ein speziell von IWS entwickeltes Fördersystem für die Laseroberflächenbehandlung.....	3
Abb. 2 Zyklonpulverdüse des IWS Dresden.....	3
Abb. 3 Laserkopf (rechts) und Versorgungseinheit (links) des Rofin DF 025.....	4
Abb. 4 Strahlprofil für Kollimation $f=60$ mm, Fokussierung $f_1=120$ mm	4
Abb. 5 Strahlprofil für Kollimation $f=60$ mm, Fokussierung $f_2=200$ mm	5
Abb. 6 Leistungsmessung des Rofin DF 025	5
Abb. 7 Pulverförderer vom Typ MF-PF 2/2 von der Firma GTV	6
Abb. 8 Messung des Pulvermassenstromes \dot{m} für die entsprechenden Tellerdrehzahlen des Drehtellers	7
Abb. 9 Pulverdüse mit Schutzgasummantelung: Prinzipskizze (links) und Original (rechts).....	8
Abb. 10 Pulverstrahl bei einer Pulvermassenstrom $\dot{m}=15,5$ g/min und einem Fördergasdurchfluss	10
Abb. 11 Pulverstrahl bei einer Fördergasdurchfluss $\underline{V}_T=2$ l/min und einem Pulvermassenstrom $\dot{m}=6,7$ g/min (links) und $\dot{m}=28,1$ g/min (rechts)	11
Abb. 12 Pulverstrahl mit geschätztem Divergenzwinkel und mit zunehmendem Durchfluss der Schutzgasummantelung \underline{V}_S , von links nach rechts: 0 l/min, 12,5 l/min, 15 l/min, 17,5 l/min	12
Abb. 13 Prinzip der Gasdruckminimierung (links) und montierte Gasdruckminimierung (rechts)	14
Abb. 14 Pulverstrahl vorgeschalteter Gasdruckminimierung mit zunehmendem Durchfluss der Schutzgasummantelung \underline{V}_S , von links nach rechts in 2,5 l/min-Schritten von 0 l/min bis 10 l/min	15
Abb. 15 Vergleich des Pulverstrahls mit und ohne Gasdruckminimierung bei verschiedenen Parametern	16
Abb. 16 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung der Laserleistung P_L	19
Abb. 17 Auftragschweißspur bei zu hoher Pulvermassenstrom \dot{m} und zu geringer Laserleistung P_L	20
Abb. 18 Auftragschweißspur bei zu hoher Pulvermassenstrom \dot{m} und viel zu geringer Laserleistung P_L	20
Abb. 19 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit.....	22
Abb. 20 Verlauf des Spannungssignals auf dem Oszilloskop zur Bestimmung von Schwankungen in der Pulvermassenstrom \dot{m}	23
Abb. 21 Querschliff durch die Auftragschweißspur mit einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=20$ mm/s	24
Abb. 22 Auftragschweißspur mit einer Bearbeitungsgeschwindigkeit $v=20$ mm/s in der Draufsicht.....	24
Abb. 23 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung des Fördergasdurchflusses \underline{V}_T	26
Abb. 24 Auftragschweißspur ohne (links) und mit (rechts) Gasdruckminimierung	27
Abb. 25 Auftragschweißspur ohne (links) und mit (rechts) Gasdruckminimierung im Querschliff.....	27

Abb. 26 Auftragschweißspur bei Verwendung der Gasdruckminimierung ohne (links) und mit (rechts) Schutzgasummantelung	28
Abb. 27 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung des Durchflusses der Schutzgasummantelung V_s	29
Abb. 28 Verlauf des Pulvernutzungsgrades η bei Veränderung des Pulvermassenstroms \dot{m}	30
Abb. 29 Längsschliff einer Auftragschweißspur mit teilweise fehlender Anbindung an das Substrat	31
Abb. 30 Querschliff einer Auftragschweißspur bei nahezu 100 % Pulvernutzungsgrad η	32
Abb. 31 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Laserleistungen P_L mit $f_1=120$ mm	35
Abb. 32 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Laserleistungen P_L mit $f_2=200$ mm	37
Abb. 33 Querschliff einer Auftragschweißspur die mit $f_2=200$ mm bei geringer Laserleistung P_L und geringem Pulvermassenstrom \dot{m} aufgetragen wurde	37
Abb. 34 Querschliff einer Auftragschweißspur die mit $f_2=200$ mm bei hoher Laserleistung P_L und hohem Pulvermassenstrom \dot{m} aufgetragen wurde	38
Abb. 35 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit $f_1=120$ mm	39
Abb. 36 Verlauf der maximal umsetzbaren Pulvermassenstrom \dot{m} und der erhaltenen Spurhöhe h bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten mit $f_2=200$ mm	40
Abb. 37 Versuchsanordnung	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Hausarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, kenntlich gemacht sind und die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung war.

Martin Tannhäuser